

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marin Šetinc

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:  
Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:  
Marin Šetinc

Zagreb, 2017.

## **Izjava i zahvala**

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i stručnu literaturu koja je navedena u sadržaju rada.

Ovom se prilikom zahvaljujem:

Mentoru prof. dr. sc. Ivici Garašiću na pomoći i savjetima tijekom izrade završnog rada, višoj asistentici dr. sc. Maji Jurici na ukazanoj podršci, i vođenju kroz eksperimentalni dio rada, tehničkom suradniku Ivanu Vovku koji mi je pomogao oko pripreme ispitnih uzoraka, te laborantima Laboratorija za zavarivanje i Laboratorija za zaštitu materijala na pomoći oko pripreme ispitnih uzoraka.

Marin Šetinc



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MARIN ŠETINC**

Mat. br.: **0035190634**

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**PRIMJENA PLINSKE MJEŠAVINE He3H1 ZA ROBOTIZIRANO  
TIG ZAVARIVANJE Cr-Ni ČELIKA**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**APPLICATION OF GAS MIXTURE He3H1 IN ROBOTIZED TIG  
WELDING OF Cr-Ni STEEL**

Opis zadatka:

Obzirom na sve intenzivniju primjenu robotiziranog zavarivanja u proizvodnji potrebno je opisati konfiguracije stanica koje se koriste za TIG zavarivanje. Analizirati mogućnost zavarivanja visokoleganih Cr-Ni čelika TIG postupkom posebno sa stanovišta odabira zaštitnih plinova. Usporediti utjecaj različitih plinskih mješavina na brzinu zavarivanja i geometriju zavara.

U eksperimentalnom dijelu oblikovati odgovarajući plan pokusa za komparativnu analizu značajki zavarivanja plinom He3H1 i 100%Ar. Odrediti optimalne parametre zavarivanja te prikladnim ispitivanjima izmjeriti geometriju zavara. Nadalje, odrediti maksimalnu brzinu zavarivanja za mješavinu He3H1 te opisati utjecaj brzine na oksidna pobojenja. Zaključno usporediti dobivene rezultate i predložiti optimalno radno područje za mješavinu He3H1.

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

Zadatak zadao:

Izv.prof.dr.sc. Ivica Garašić

Rok predaje rada:

1. rok: 24. veljače 2017.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.

3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.

2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.

3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

v.d. predsjednika Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

# Sadržaj

Popis slika .....	II
Popis oznaka.....	V
Sažetak .....	VI
Summary .....	VII
1. Uvod.....	1
2. Osnove TIG postupka .....	3
2.1. Osnovni dijelovi uređaja.....	3
2.2. Princip i tehnike rada ručnog TIG zavarivanja.....	4
2.3. Izvori električne struje .....	7
2.4. Pištolj za zavarivanje .....	8
2.5. Netaljive elektrode.....	10
2.6. Zaštitni plinovi.....	14
2.7. Zavarljivost visokolegiranih Cr-Ni čelika TIG postupkom.....	18
3. Stanice za TIG zavarivanje .....	20
3.1. Uvod .....	20
3.2. Robotizacija zavarivanja .....	21
3.3. Konfiguracije stanice za robotizirano TIG zavarivanje .....	22
4. Eksperimentalni dio .....	31
4.1. Oprema i izvor struje za zavarivanje .....	31
4.2. Osnovni materijal .....	32
4.3. Priprema osnovnog materijala .....	34
4.4. Parametri TIG navarivanja .....	35
4.4.1. Izbor volframove elektrode .....	35
4.4.2. Zaštitni plin .....	35
4.4.3. Izrada programa za robotizirano zavarivanje .....	36
4.5. Navarivanje.....	41
4.6. Izrada makroizbrusaka.....	50
4.7. Analiza makroizbrusaka .....	53
5. Zaključak.....	60
6. Literatura.....	61

# Popis slika

Slika 1.	Osnovni dijelovi uređaja za ručno TIG zavarivanje [2] .....	3
Slika 2.	Shematski prikaz TIG zavarivanja [4] .....	4
Slika 3.	Položaj elektrode i dodatnog materijala u odnosu na radni komad [5] .....	5
Slika 4.	Tehnika ručnog zavarivanja TIG postupkom .....	6
Slika 5.	Osnovne karakteristike različitih pravokutnih impulsnih oblika [6] .....	8
Slika 6.	TIG pištolj za ručno zavarivanje [8] .....	9
Slika 7.	Stabilan i nestabilan protok zaštitnog plina [9] .....	10
Slika 8.	Brušenje volframove elektrode [10] .....	13
Slika 9.	Izgled pravilno i nepravilno nabrušene volframove elektrode [10] .....	13
Slika 10.	Vrste električnog luka ovisno o brušenju volframove elektrode [11] .....	13
Slika 11.	Oblik i učinak električnog luka kod helija (He) i argona (Ar) [14] .....	17
Slika 12.	Mikrostruktura austenitnog čelika: potpuni austenit slika lijevo, austenit i delta ferit slika desno [15] .....	18
Slika 13.	Primjer robotiziranog (lijevo) i automatiziranog (desno) zavarivanja [17] .....	21
Slika 14.	Stanica za robotizirano zavarivanje [17] .....	22
Slika 15.	Robotski manipulatori različite veličine [17] .....	23
Slika 16.	Robotski manipulatori 1 [17] .....	23
Slika 17.	Robotski manipulatori 2 [17] .....	24
Slika 18.	Robotski manipulatori 3 [17] .....	24
Slika 19.	Upravljačka jedinica i privjesak za učenje [17] .....	24
Slika 20.	Izvori struje za robotsko zavarivanje [17] .....	25
Slika 21.	Pištolj za robotizirano TIG zavarivanje s automatskim dodavanjem dodatnog materijala 1 [18] .....	25
Slika 22.	Pištolj za robotizirano TIG zavarivanje s automatskim dodavanjem dodatnog materijala 2 [19] .....	26
Slika 23.	Pištolj za robotizirano TIG zavarivanje bez automatskog dodavanja dodatnog materijala [17] .....	26
Slika 24.	Jednostruki robotizirani okretni pozicioner [17] .....	27
Slika 25.	Dvostruki robotizirani okretni pozicioneri (vertikalni - slika lijevo i sredina, horizontalni - slika desno) [17] .....	27
Slika 26.	Robotizirani okretno-nagibni pozicioner [17] .....	28
Slika 27.	Ručno upravljani okretni pozicioner [17] .....	28
Slika 28.	Pokretna traka [17] .....	29
Slika 29.	Senzori koji se primjenjuju kod potpune automatizacije zavarivanja [5] .....	30
Slika 30.	Mehanički kontakti senzor (slika lijevo) i senzor za praćenje napona i struje električnog luka prilikom njihanja (slika desno) [17] .....	30
Slika 31.	Robotska stanica VCR-1G MIG + 1G TIG/1dm [17] .....	32
Slika 32.	Ispitivanje kemijskog sastava ploče AISI 304 .....	33
Slika 33.	Priprema površine osnovnog materijala .....	34
Slika 34.	Preporučeni izgled volframove elektrode kod automatiziranog TIG navarivanja austenitnih čelika .....	35
Slika 35.	Program za navarivanje .....	36
Slika 36.	Određivanje parametara zavarivanja (stranica 1) .....	37
Slika 37.	Određivanje parametara zavarivanja (stranica 2) .....	38

Slika 38. Određivanje parametara zavarivanja (stranica 3) .....	39
Slika 39. Privjesak za učenje .....	40
Slika 40. Putanje vrha volframove elektrode [5] .....	41
Slika 41. Fluke 566 IR termometar .....	42
Slika 42. Grafički prikaz utjecaja napona o brzini zavarivanja .....	43
Slika 43. Grafički prikaz utjecaja unosa topline o brzini zavarivanja .....	43
Slika 44. Uzorak 1 .....	44
Slika 45. Uzorak 2 .....	44
Slika 46. Uzorak 3 .....	44
Slika 47. Uzorak 4 .....	45
Slika 48. Uzorak 1A .....	45
Slika 49. Uzorak 2A .....	45
Slika 50. Uzorak 3A .....	45
Slika 51. Uzorak 4A .....	46
Slika 52. Izgled prednje površine svih zavara .....	46
Slika 53. Izgled stražnje površine svih zavara .....	47
Slika 54. Rezanje čelične ploče na manje komade na CNC plazma rezaču Vanad .....	51
Slika 55. Izrezivanje makroizbrusaka na tračnoj pili IMET GBS 185 ECO .....	51
Slika 56. Poliranje uzoraka na uređaju za poliranje Buehler Phoenix Alpha .....	52
Slika 57. Snimanje makroizbrusaka korištenjem Leica MZ6 stereomikroskopa .....	52
Slika 58. Makroizbrusak 1 .....	53
Slika 59. Makroizbrusak 1A .....	53
Slika 60. Makroizbrusak 2 .....	54
Slika 61. Makroizbrusak 2A .....	54
Slika 62. Makroizbrusak 3 .....	55
Slika 63. Makroizbrusak 3A .....	55
Slika 64. Makroizbrusak 4 .....	56
Slika 65. Makroizbrusak 4A .....	56
Slika 66. Usporedba svih makroizbrusaka .....	57
Slika 67. Utjecaj zaštitnog plina na širinu navara pri različitim brzinama navarivanja .....	58
Slika 68. Grafički prikaz utjecaja penetracije o brzini zavarivanja .....	58

## Popis tablica

Tablica 1. Označavanje volframovih elektroda [1].....	11
Tablica 2. Vrijednosti koeficijenata opterećenja elektrode za razne vrste volframovih elektroda [1, 6] .....	12
Tablica 3. Tehnički zahtjevi i njihovo zadovoljavanje u automatizaciji i robotizaciji zavarivanja.....	20
Tablica 4. Plan pokusa .....	31
Tablica 5. Kemijski sastav čelika AISI 304.....	33
Tablica 6. Parametri robotiziranog TIG zavarivanja .....	43
Tablica 7. Boje oksidnog sloja prema temperaturi nastajanja [20].....	47
Tablica 8. Penetracija i širina zavara .....	58



## Popis oznaka

Oznaka	Opis	Mjerna jedinica
Al	aluminij	-
Mg	magnezij	-
Cu	bakar	-
Ti	titan	-
W	volfram	-
Ce	cerij	-
La	lantan	-
Zr	cirkonij	-
Th	torij	-
Mo	molibden	-
Nb	niobij	-
Ta	tantal	-
Ar	argon	-
H	vodik	-
He <sub>2</sub>	helij	-
N	dušik	-
Q	volumni protok zaštitnog plina	[l/min]
$\varphi$ elektrode	promjer elektrode	[mm]
I	jakost struje	[A]
U	napon	[U]
V <sub>z</sub>	brzina zavarivanja	[cm/min]
Q	unos topline	[kJ/mm]
k <sub>min</sub> /k <sub>max</sub>	koeficijent opterećenja elektrode	-
t	vrijeme	[s]
p	penetracija zavara	[mm]
h	nadvišenje zavara	[mm]
b	širina zavara	[mm]
A	površina zavara	[mm <sup>2</sup> ]
v <sub>t</sub>	talište	[°C]
v	temperatura	[°C]
$\lambda$	toplinska vodljivost	[W/mK]
E	modul elastičnosti	[N/mm <sup>2</sup> ]
R <sub>m</sub>	vlačna čvrstoća	[N/mm <sup>2</sup> ]
R <sub>p0,2</sub>	granica razvlačenja	[N/mm <sup>2</sup> ]
KV	udarni rad loma	[J]

## Sažetak

U ovom radu ispitan je utjecaj zaštitnog plina na značajke zavarivanja austenitnih čelika.

U teorijskom dijelu dani su osnovni podatci o TIG postupku zavarivanja, zavarljivosti visokolegiranih Cr-Ni čelika i stanicama za TIG zavarivanje.

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je zavarivanje uzoraka TIG postupkom s dva različita zaštitna plina i s četiri različite brzine zavarivanja. Osnovni je materijal austenitni nehrđajući čelik oznake AISI 304 debljine 4 mm, a dodatni materijal nije korišten. Nakon zavarivanja pripremljeni su makroizbrusci na kojima je provedeno ispitivanje koje je korišteno za donošenje zaključaka o utjecaju zaštitnog plina na profil i površinski izgled navara.

Ključne riječi: austenitni čelik, zaštitni plin, robotizirano TIG zavarivanje

## Summary

This thesis describes the effect of the shielding gases on geometry and appearance of austenite stainless steels.

The theoretical part gives some basic information about the TIG welding process, weldability of high Cr-Ni steel and stations for TIG welding.

The experimental part is carried out with TIG welding process using two different shielding gases and four different welding speed. The basic material is austenite stainless steel AISI 304, 4 mm thick, and the filler material was not used. After welding macro specimens were prepared and tested and used to draw conclusions about the impact of the shielding gas on parameters TIG welds.

Keywords: austenite steel, shielding gas, robotized TIG welding

# 1. Uvod

Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plinova (TIG zavarivanje) postupak je zavarivanja kod kojeg se energija potrebna za taljenje osnovnog i po potrebi dodatnog materijala dovodi kroz električni luk. Električni luk uspostavlja se i održava između netaljive elektrode izrađene od volframa ili volframovih legura i osnovnog materijala. Mjesto zavarivanja-zagrijana zona, rastaljeni osnovni metal, dodatni materijal-zagrijani i rastaljeni vrh žice te zagrijani vrh netaljive elektrode u procesu zavarivanja štite se od štetnog djelovanja okolne atmosfere tako da se neaktivni (inertni) plinovi upuhuju kroz keramičku sapnicu koaksijalno smještenu oko netaljive volframove elektrode.

Kod TIG postupka zavarivanja prijenos kapljice metala ne odvija se kroz električni luk (kako je to slučaj kod ostalih elektrolučnih postupaka zavarivanja), već se dodatni materijal (žica ili šipka) dodaje u prednji rub taline gdje se potom tali pod električnim lukom i spaja s talinom zavara. [1]

TIG postupak zavarivanja najčešće je ručni postupak što znači da će kvaliteta samog zavara ovisiti o vještini operatera-zavarivača, međutim danas je sve češća primjena robotiziranog TIG zavarivanja.

Osim naziva TIG u stručnoj se literaturi često može naći i GATW koji je skraćenica za Gas Tungsten Arc Welding. U njemačkoj se stručnoj literaturi koristi skraćenica WIG koja dolazi od Wolfram Inert Gas Schweissen.

TIG zavarivanje razvilo se iz potrebe avionske industrije za zavarivanjem konstrukcija napravljenih od aluminijske i magnezijске. 1930. godine H.M. Hobart i P.K. Devers provode zavarivanje u komori ispunjenoj inertnim plinom (argon i helij). 1941. godine V.H. Pavlecka i Russel Meredith dizajnirali su prvi TIG pištolj za zavarivanje, a 1942. godine u tvrtki Northrop Aircraft patentiran je Heliarc proces zavarivanja (zavarivanje magnezijских legura pod zaštitnim plinom helijem). [1]

Iako se u početku TIG postupak koristio samo za zavarivanje lakih metala, danas je njegova upotreba puno raširenija te se ovaj postupak primjenjuje za zavarivanje aluminijske i Al-legura, magnezijске i Mg-legura, bakra i Cu-legura, nehrđajućih čelika, titana i Ti-legura. Kao zaštitni plinovi koriste se argon i helij ili mješavine različitih plinova. [1]

**Prednosti TIG zavarivanja: [1]**

- primjenjiv je za zavarivanje raznolikih metala i legura
- primjenjiv je za sve oblike i položaje radnog komada
- mogućnost zavarivanja složenih oblika
- nema rasprskavanja kapljica metala
- nema čišćenja troske
- nema dima i štetnih plinova
- pravilno izvedeni zavareni spoj spada u najkvalitetnije zavarene spojeve
- zavar je vrlo čist, gladak i lijep
- mogućnost dugotrajnog rada zbog integriranog vodenog hlađenja pištolja

**Nedostaci TIG zavarivanja: [1]**

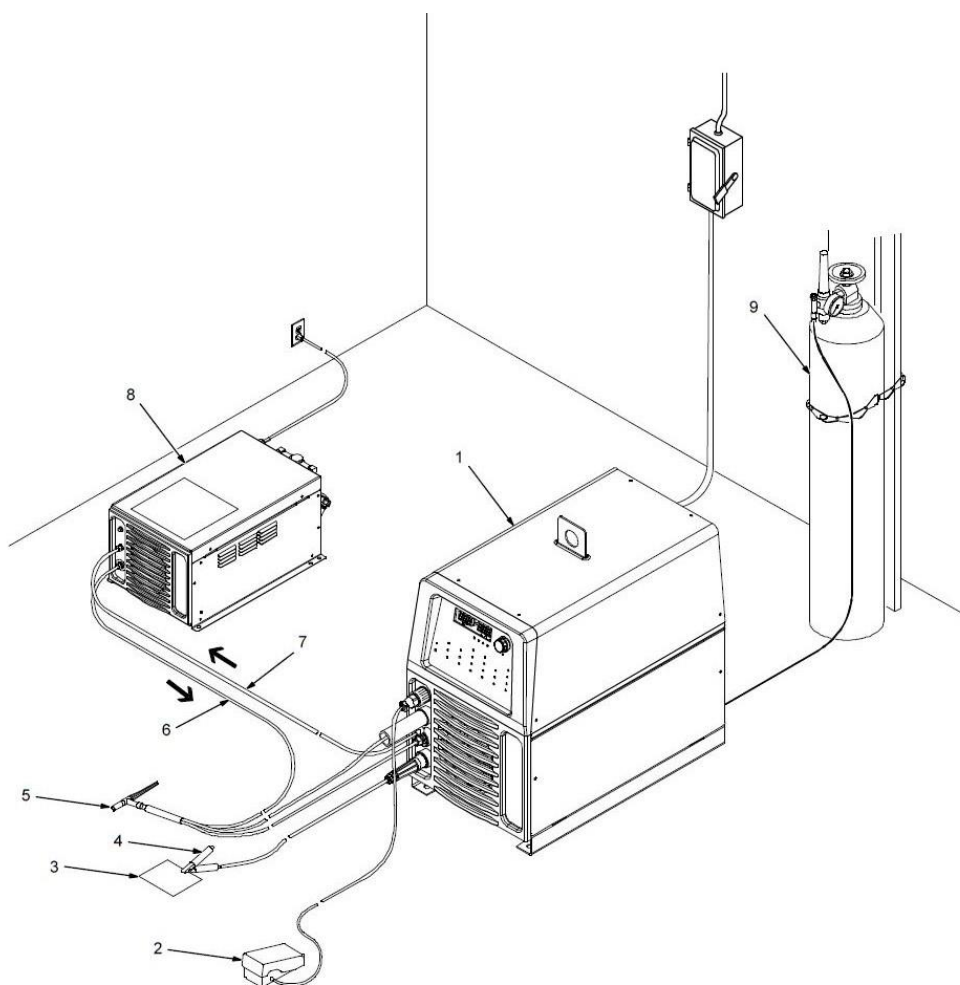
- neekonomičnost u zavarivanju debljih materijala (iznad 6 mm)
- otežan rad na otvorenom kod većih strujanja zraka (utjecaj vjetra)
- skupi zaštitni plinovi
- zahtijeva veliku točnost i čistoću u pripremi spoja
- skupa i dugotrajna obuka certificiranih i atestiranih zavarivača TIG postupkom

## 2. Osnove TIG postupka

### 2.1. Osnovni dijelovi uređaja

Osnovni dijelovi od kojih se sastoji uređaj za ručno TIG zavarivanje prikazani su na Slici 1., a oni su sljedeći:

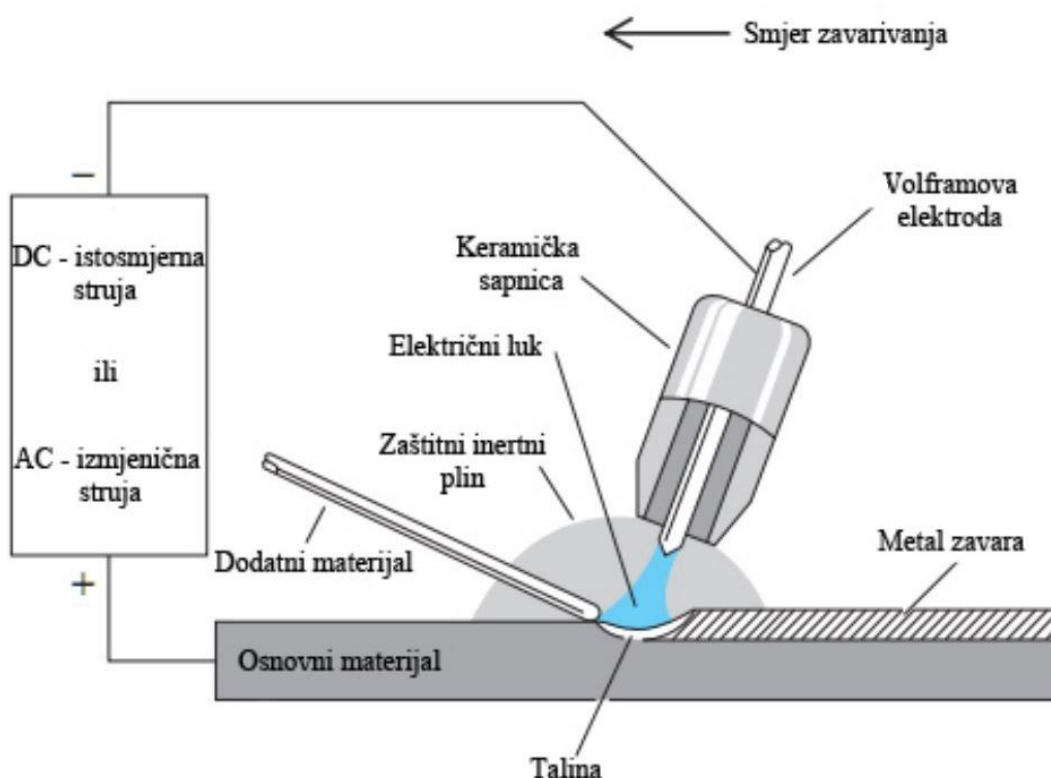
1. izvor struje (u kojemu se nalazi transformator strujni ispravljač i upravljačka elektronika) i sistem za hlađenje
2. nožni prekidač
3. radni komad
4. stezna kliješta
5. pištolj za zavarivanje
6. izlazno crijevo sustava za hlađenje pištolja za zavarivanje
7. ulazno crijevo sustava za hlađenje pištolja za zavarivanje
8. sustav hlađenja
9. boca sa zaštitnim plinom (s regulatorima tlaka i protoka plina)



Slika 1. Osnovni dijelovi uređaja za ručno TIG zavarivanje [2]

Kod TIG postupka izvor struje spaja se na električnu mrežu, a na jedan priključak izvora struje spaja se pištolj za zavarivanje (ovisno o materijalu s kojim se radi odabrati odgovarajući pol na koji se spaja pištolj – DC+/DC-/AC). Na drugi priključak spaja se radni komad pomoću steznih kliješta. Sustav hlađenja služi za dvije funkcije: hlađenje pištolja za zavarivanje i hlađenje izvora struje. Ovaj se sustav sastoji od pumpe, hladnjaka crijeva kojima je sve povezano i samog sredstva hlađenja (najčešće voda ili antifriz). Osim na izvor struje i sustav hlađenja, pištolj za zavarivanje spojen je gumenim crijevom i na bocu sa zaštitnim plinom. Svi prethodno navedeni priključci koji se nalaze na pištolju za zavarivanje do njega dolaze u jednom unificiranom dovodu tj. u polikabelu. Korištenjem polikabela olakšava se manipulacija dovodima struje, sredstva hlađenja i zaštitnog plina, a istovremeno se ti dovodi štite od oštećenja. Zaštitni plin nalazi se u atestiranoj čeličnoj boci, a na njezinom vrhu nalaze se reducir ventil na koje se dalje nadovezuju mjerni instrumenti te regulatori tlaka i protoka plina. [2, 3]

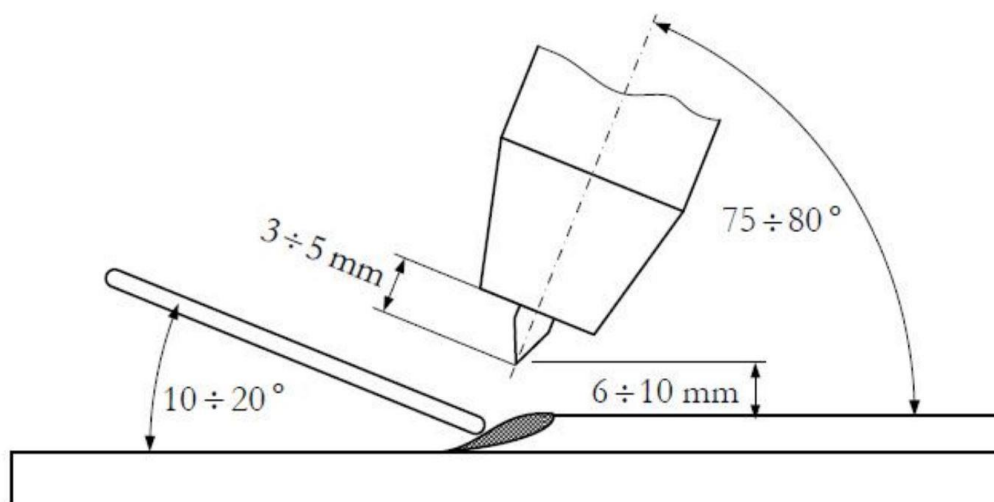
## 2.2. Princip i tehnike rada ručnog TIG zavarivanja



Slika 2. Shematski prikaz TIG zavarivanja [4]

Postupak ručnog TIG zavarivanja započinje pritiskanjem prekidača na pištolju za zavarivanje ili pritiskanjem nožnog prekidača. Tada kroz sapnicu počinje istjecati zaštitni plin i započinje cirkulacija rashladnog sredstva. Kada se pištolj za zavarivanje dovoljno primakne radnome komadu upravljačka elektronika šalje visokofrekventnu struju koja lagano ionizira

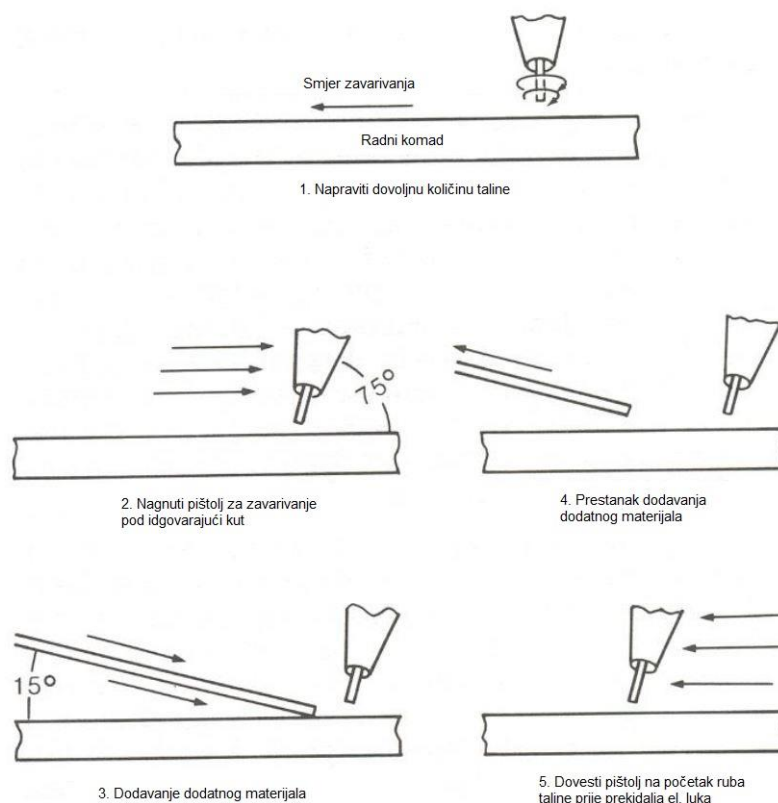
atmosferu koja se sastoji od zaštitnog plina i time omogućuje jednostavnije preskakanje iskre između volframove elektrode i radnog komada, čime se uspostavlja električni luk. Tako uspostavljeni električni luk u struji zaštitnog plina doseže temperaturu od oko 20 000 °C kojom tali osnovni materijal. U talinu koja je nastala zbog djelovanja električnog luka (ali ne i u električnom luku) u točno određenim vremenskim intervalima dodaje se dodatni materijal koji se tali u prednjem rubu taline osnovnog metala te se zajedno s osnovnim materijalom spaja u metal zavara, kako je prikazano na Slici 2. Kod nekih slučajeva nije potrebno dodavati dodatni materijal već se osnovni metal tali i čini metal zavara. Tijekom postupka zavarivanja pištolj za zavarivanje se pomiče i dodaje se dodatni materijal određenom brzinom ovisno o kvaliteti pripreme samog spoja i uz određenu tehniku rada. Prestankom pritiska na prekidač pištolja prekida se električni luk, a zaštitni plin ostaje istjecati još neko vrijeme iz sapnice pištolja za zavarivanje s ciljem zaštite još rastaljenog metala zavara i vrha elektrode od oksidacije i onečišćenja. Stoga se nakon gašenja električnog luka pištolj za zavarivanje i dalje mora ostaviti nad radnim komadom koji je zavarivan.



Slika 3. Položaj elektrode i dodatnog materijala u odnosu na radni komad [5]

Na Slici 3. vidi se točno definirani pravilan položaj elektrode i dodatnog materijala. Kut pištolja za optimalno zavarivanje TIG postupkom mora biti između  $75^\circ$  i  $80^\circ$ . Dodatni materijal mora se dodavati pod kutom od  $10^\circ$  do  $20^\circ$ . Sami vrh volframove elektrode mora viriti iz keramičke sapnice 3 do 5 mm, a propisani razmak između vrha same elektrode i radnog materijala mora biti 6 do 10 mm [1].





Slika 4. Tehnika ručnog zavarivanja TIG postupkom

Kao što je prikazano na Slici 4., nakon što se električni luk uspostavi, početno mjesto zavara treba se dobro protaliti tako da se stvori određena količina taline osnovnog materijala, a tek naknadno treba po potrebi dodavati dodatni materijal u obliku žice. To isto vrijedi i kod izvođenja nastavaka. Cijeli završni krater treba temeljito pretaliti tako da se postigne ista ili slična količina taline kao kod završetka zavarivanja, a potom se počinje s dodavanjem žice i nastavlja zavarivanje.

Prekidanje električnog luka najpovoljnije je postupnim gašenjem električnog luka. Kod suvremenih uređaja postoji automatizirano podesivo postepeno smanjivanje jakosti električnog luka i na kraju gašenje samog električnog luka. Tako se u završnom krateru ne stvara udubljenje popraćeno sitnim pukotinama. Ako na samom stroju za zavarivanje ne postoje mogućnosti postepenog gašenja električnog luka, prekidanje električnog luka moguće je izvesti postupnim smanjenjem struje zavarivanja i laganim malim pokretom pištolja unazad na već skrutnuti i vrući dio zavara gdje se električni luk prekida. Istodobno se može u talinu dodati žica radi popune kratera. Ta tehnika se izvodi tako vješto da električni luk svojom snagom ne rastjeruje, nego popunjava završetak taline. Kada se električni luk skroz prekine, pištolj mora ostati pri završetku sve dok zaštitni plin ne istekne do kraja (oko 10 do 15 sekundi).

Početak zavara valja uvijek promatrati kao mjesto gdje je moguća pojava greške hladnog naljepljivanja, a završetak treba promatrati kao mjesto gdje su moguće sitne pukotine. Radi toga, kod svih slučajeva kod kojih je moguće, početak i završetak zavara se mora izvoditi na pomoćnoj - produžnoj pločici. Kod slučajeva kod kojih to nije moguće kao npr. zavarivanja cijevi, početak i završetak zavara valja izvoditi besprijekorno. [1]

## 2.3. Izvori električne struje

Izvori struje za TIG zavarivanje mogu biti transformatori, ispravljači i inverteri. Izvori imaju konstantnu strujnu karakteristiku, što znači da tijekom vremena struja ostaje više manje konstantna (a stoga i unos topline), dok se duljina luka i napon mogu mijenjati tijekom vremena.

Kod TIG postupka za zavarivanje čelika, nikla, titana i ostalih metala koristi se DC - polaritet. Ovim se postupkom toplina stvara tako da elektroni koji putuju s negativno nabijene volframove elektrode prema pozitivno nabijenom radnom komadu uzrokuju toplinsku ionizaciju zaštitnog plina, čime se podiže temperatura radnog komada. Od ukupne količine topline 70% završi na radnom komadu i koristi se za taljenje osnovnog i dodatnog materijala, dok preostalih 30% uzrokuje zagrijavanje volframove elektrode. Primjenom DC- polariteta na volframovoj elektrodi dobiva se vrlo dobra i uska penetracija.

Osim DC- polariteta može se koristiti i DC+ polaritet na kojem je volframova elektroda spojena na DC+ priključak na izvoru struje. Ovdje je puno bolje svojstvo čišćenja oksida s površine radnog komada, ali je zato vrlo veliko toplinsko opterećenje volframove elektrode (70% na elektrodi, 30% na radnom komadu) i penetracija je relativno mala i široka.

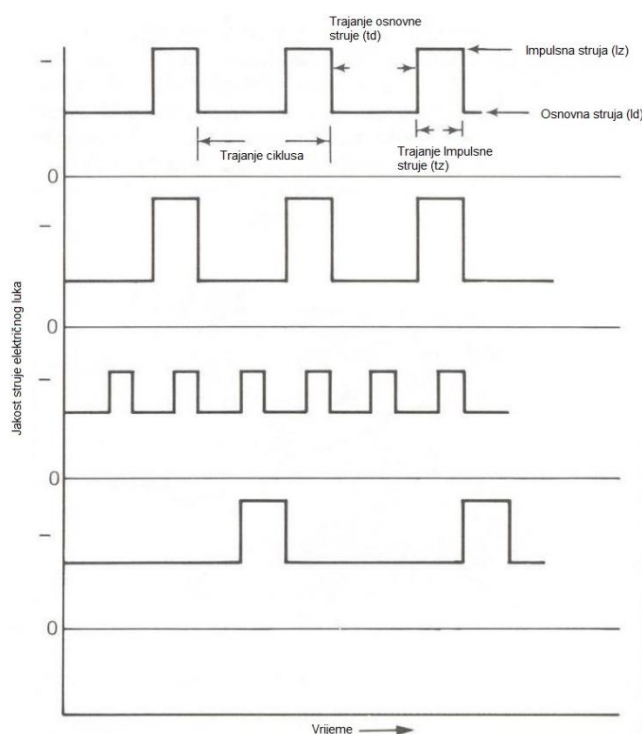
Za zavarivanje aluminija i magnezija TIG postupkom najčešće se koristi izmjenična struja (AC). Njezinom primjenom imamo proces čišćenja površine od oksida pola radnog ciklusa, dok u drugoj polovici imamo proces zagrijavanja radnog komada. 50% topline služi za zagrijavanje ranog komada, dok 50% topline uzrokuje zagrijavanje volframove elektrode. Penetracija će biti negdje u sredini između penetracije kakva se postiže kada je volframova elektroda spojena na DC- i kada je spojena na DC+.

U principu za aparaturu TIG zavarivanja grade se posebni izvori struje zavarivanja koji mogu biti kombinirani. Takvi izvori struje građeni su tako da se koriste kao ispravljači i kao transformatori što se ostvaruje prebacivanjem sklopa na izvoru. Suvremeni izvori grade se s takvim karakteristikama da je s njima moguće obavljati impulsno TIG zavarivanje.

Uređaj za proizvodnju visokofrekventne električne struje je dodatni mali transformator. Može biti smješten u izvoru struje ili izvan izvora u komandnom ormariću. Ovaj uređaj proizvodi električnu struju vrlo visokog napona od nekoliko tisuća volti. Budući da je frekvencija struje vrlo visoka ne postoji opasnost pod život zavarivača zbog pojave "skin effect-a". Ova visokofrekventna električna struja služi za uspostavljanje električnog luka bez dodira vrha elektrode s radnim komadom i za održavanje stabilnosti električnog luka kod zavarivanja s izmjeničnom električnom strujom. Uređaj se ugrađuje na izvor izmjenične i istosmjerne struje zavarivanja. [1, 6]

Izvori električne struje za impulsno TIG zavarivanje građeni su tako da se mogu programski podesiti za mijenjanje jakosti struje u određenim vremenskim intervalima tijekom zavarivanja. Jednostavnije protumačeno, impulsno TIG zavarivanje način je zavarivanja gdje se jakost električne struje pravilno mijenja u dvije razine. U određenom vremenskom razdoblju (tz), čije se trajanje može podesiti, prolazi električna struja veće jakosti ( $I_z$ ) s kojom se tali i protaljuje, potom slijedi struja manje jakosti ( $I_d$ ), opet u određenom vremenskom razdoblju (td), koja dozvoljava skrućivanje pretaljenog mjesta, ali ne i hlađenje. Tako se u određenim vremenskim intervalima, ponavlja zavarivanje jačom pa slabijom električnom strujom, a

zavareni spoj izgleda kao da je sastavljen od niza točaka protaljivanja koje se preklapaju jedna preko druge. Na Slici 5. prikazana je mogućnost dobivanja različitih pravokutnih impulsnih oblika električnog luka uz pomoć posebnog impulsnog TIG napajanja.

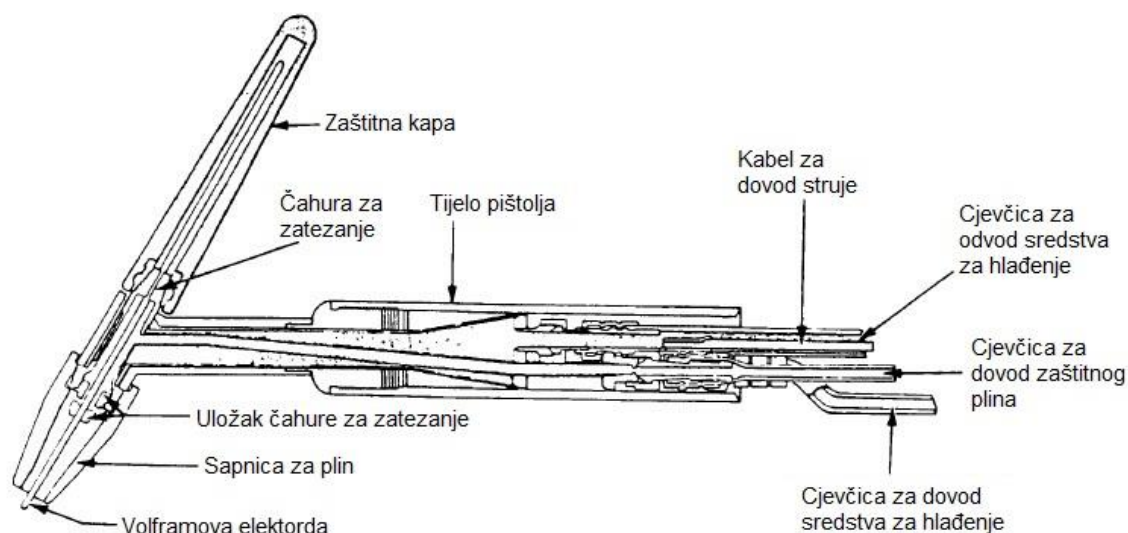


Slika 5. Osnovne karakteristike različitih pravokutnih impulsnih oblika [6]

## 2.4. Pištolj za zavarivanje

Pištolji za zavarivanje mogu se podijeliti u dvije osnovne grupe ovisno o načinu hlađenja i dizajnu. Podjela pištolja za zavarivanje prema načinu hlađenja je na one s hlađenjem rashladnim medijem (za struje velike jakosti – do 600 A) i na one bez hlađenja pištolja za zavarivanje (struje jakosti do 200 A). Prema dizajnu pištolji za zavarivanje dijele se na ručne i na pištolje za robotizirano zavarivanje (umjesto dijela za držanje imaju dio za montiranje na robot). Oblici pištolja mogu biti različiti, ima ih većih i manjih, ovisno o potrebama zavarivača. Za zavarivanje na teško pristupačnim mjestima izrađuju se pištolji za zavarivanje posebnih oblika i dimenzija.

Tipičan pištolj za zavarivanje prikazan je na Slici 6., a sastoji se od tijela pištolja, čahure za stezanje elektrode, sapnice za plin, volframove elektrode, zaštitne kape na volframovoj elektrodi i priključaka na tijelu pištolja (priključci za zaštitni plin, dovod i odvod sredstva za hlađenje i izvod električne struje). Na tijelu pištolja nalazi se i prekidač za ukapčanje električnih komandi. Svi prethodno navedeni priključci objedinjeni su u polikabelu dužine 5-8 m koji je priključen na izvor struje. [7]



Slika 6. TIG pištolj za ručno zavarivanje [8]

Sapnice za plin mogu biti različitih oblika i veličina, ovisno o jakosti struje i mjestu zavarivanja. Sapnice mogu biti izrađene od keramike ili od kromiranog bakra. Za manje i srednje jakosti struje zavarivanja koriste se keramičke sapnice, a za veće jakosti struje koriste se metalne sapnice koje su hladene vodom. Biraju se prema unutarnjem promjeru otvora sapnice i promjeru volframove elektrode, budući da se promjer volframove elektrode bira u odnosu na jakost struje zavarivanja. Unutarnji promjer sapnice šest je puta veći od promjera volframove elektrode kod manjih promjera elektrode (do 2,4 mm) odnosno pet puta veći od promjera elektrode kod većih promjera elektroda (3,2 ili više mm).

Sapnice za plin biraju se prema obliku mjesta zavarivanja odnosno prema mogućnosti pristupa. Kod jačih struja zavarivanja nužna je veća količina zaštitnog plina kao i veći promjer elektrode pa se izbor veličine sapnice može povezati s izborom promjera elektrode. Kod tanjih elektroda do promjera 2,4 mm odnos promjera elektrode i unutarnjeg promjera sapnice iznosi približno 1:5 - 1:6. Kod debljih elektroda taj odnos iznosi blizu 1:4. Najčešće se primjenjuju sapnice unutarnjeg promjera 12 - 18 mm. Sapnica mora dobro brtviti. Ako slabo brtvi dolazi do uvlačenja zraka uslijed injektorskog djelovanja struje izlazećeg plina [7].

O samom obliku sapnice ovisit će protok i kvaliteta protoka plinova što se vidi iz Slike 7. Gornja konusno sužena sapnica bez mrežice uzrokuje turbulentno strujanje plina, a kod donje ravne sapnice s mrežicom na kraju otvora izraženo je fokusirano laminarno strujanje. [9]



Slika 7. Stabilan i nestabilan protok zaštitnog plina [9]

## 2.5. Netaljive elektrode

Volframova elektroda provodnik je električne struje s pištolja na radni komad. Između volframove elektrode i radnog komada uspostavlja se električni luk koji tali metal osnovnog i dodatnog materijala, a da se pri tome sama elektroda ne tali. Izrađuje se iz čistog volframa ili volframa s dodacima torijevog oksida ( $\text{ThO}_2$ ), cirkonijevog oksida ( $\text{ZrO}_2$ ), lantanovog oksida ( $\text{La}_2\text{O}_3$ ) ili cerijevog oksida ( $\text{CeO}_2$ ). Temperatura tališta volframa je  $3410\text{ }^\circ\text{C}$  pa se u zaštiti plina argona ne tali kod zavarivanja. Na zraku oksidira kod temperatura većih od  $400\text{ }^\circ\text{C}$ , u dušiku nitrira kod temperatura većih od  $1430\text{ }^\circ\text{C}$ , a u ugljičnom dioksidu oksidira kod temperatura većih od  $700\text{ }^\circ\text{C}$ .

Volframove elektrode izrađuju se u standardnim promjerima: 0.5, 1.0, 1.6, 2.4, 3.2, 4.0, 6.4 i 8.0 mm i standardnim dužinama: 50, 75, 150, 175 i 200 mm. Volframove elektrode se označavaju prema sastavu materijala elektrode u slovnoj, brojčanoj i oznaci u boji.

Tablica 1. Označavanje volframovih elektroda [1]

Oznaka (ISO)	Dodatak oksida (%)	Vrsta oksida	Oznaka bojom
W	---	---	Zelena
WC 20	1,8 – 2,2	CeO <sub>2</sub>	Siva
WL 10	0,9 – 1,2	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Crna
WL 15	1,4 – 1,6	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Zlatna
WL 20	1,9 – 2,1	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Plava
WZ 4	0,3 – 0,5	ZrO <sub>2</sub>	Smeđa
WZ 8	0,7 – 0,9	ZrO <sub>2</sub>	Bijela
WT 10	0,8 – 1,2	ThO <sub>2</sub>	Žuta
WT 20	1,7 – 2,2	ThO <sub>2</sub>	Crvena
WT 30	2,8 – 3,2	ThO <sub>2</sub>	Ljubičasta
WT 40	3,8 – 4,2	ThO <sub>2</sub>	Narančasta

Volframove elektrode (W) koriste se za zavarivanje izmjeničnom električnom strujom dok se ostale elektrode koriste za rad istosmjernom i izmjeničnom strujom zavarivanja.

Elektrode legirane torijevim oksidom (ThO<sub>2</sub>) su blago radioaktivne elektrode (izuzetno blago emitiranje  $\alpha$  - čestica) koje omogućavaju puno lakše uspostavljanje električnog luka, mogu raditi na puno većim strujama tijekom procesa zavarivanja i imaju odličnu stabilnost električnog luka tijekom zavarivanja. Također ih odlikuje niža granica minimalnog opterećenja i duži radni vijek.

Elektrode legirane cirkonijevim oksidom (ZrO<sub>2</sub>) imaju odlična svojstva pri zavarivanju izmjeničnom strujom zato što pridržavaju zaobljeni vrh elektrode tijekom zavarivanja i sprječavaju kontaminaciju zavara. Također, omogućuju jednostavnije uspostavljanje električnog luka.

Elektrode legirane lantanovim oksidom (La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) imaju slične karakteristike kao torirane volframove elektrode; omogućuju puno jednostavnije uspostavljanje električnog luka, dobru stabilnost električnog luka, dugi životni vijek i rad s jakim strujama. One su moguća zamjena za torirane volframove elektrode.

Elektrode legirane cerijevim oksidom (CeO<sub>2</sub>) imaju slične karakteristike kao torirane volframove elektrode. Omogućuju puno jednostavnije uspostavljanje električnog luka, dobru stabilnost električnog luka i dugi životni vijek, ali ne mogu raditi s jakim strujama kao lantanove elektrode. One su moguća zamjena za torirane volframove elektrode. [7]

Pravilno opterećivanje volframove elektrode rezultirat će produljenjem radnog vijeka same elektrode, a ujedno doprinosi i smanjenju onečišćenja zavarenog spoja volframom. Jakost struje zavarivanja u odnosu na promjer volframove elektrode računa se prema sljedećoj formuli:

$$I = 100 \cdot d \cdot k \text{ [A]}$$

Gdje je  $d$  promjer elektrode u mm, a  $k$  koeficijent opterećenja elektrode, te je on različit kod različitih vrsta elektroda, a njegove su vrijednosti prikazane u priloženoj Tablici 2.

Tablica 2. Vrijednosti koeficijenata opterećenja elektrode za razne vrste volframovih elektroda [1, 6]

Vrsta elektrode:	W	WT 10	WT 20	WT 30	WT 40, WZ 8, WL 10
$k_{\min}$	0,45	0,40	0,35	0,30	0,50
$k_{\max}$	0,55	0,65	0,75	0,80	1

Kod ispravno opterećene volframove elektrode na oštrom vrhu formira se mala kapljica taline volframa u obliku kuglice kroz koju se održava stabilan električni luk. Kod zaobljenog vrha elektrode ne stvara se takva kapljica nego vrh ostaje zaobljen. Kod zavarivanja je samo krajnji vrh volframove elektrode vidljivo zagrijan. Preopterećena elektroda brže se troši te onečišćuje zavar volframom, dok premalo opterećena elektroda daje nestabilan električni luk.

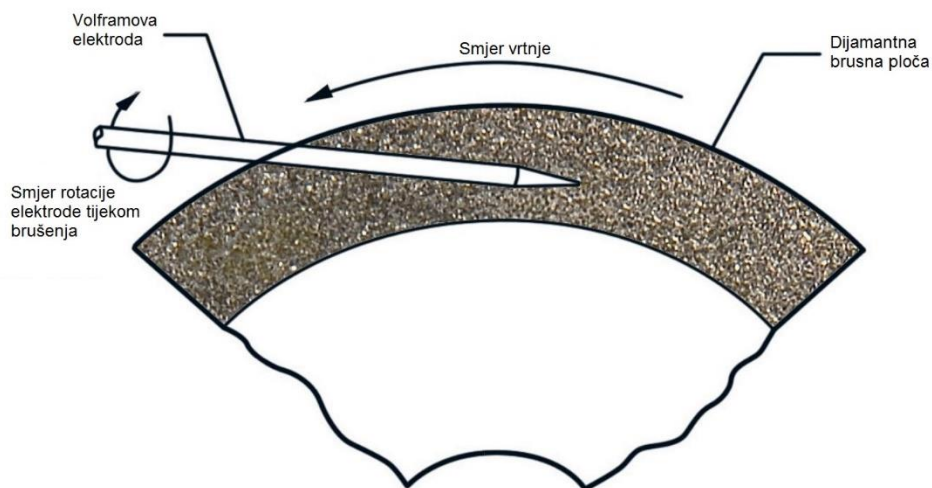
Oblik vrha volframove elektrode može biti šiljast ili zaobljen, te ovisi o tome koji se metal zavaruje (vrsta metala i njegova debljina), odnosno kojom se vrstom električne struje zavaruje.

Tako se pri zavarivanju aluminijske, magnezijске ili njihovih legura u pravilu treba uzimati elektroda od čistog volframa (zelena ili cirkonirana elektroda), a vrh elektrode treba zaobliti.

Kada se zavaruju ostali metali u pravilu se koristi torirana elektroda (žuta, crvena, ljubičasta, narančasta) i vrh elektrode zašilji se pod određenim kutom.

Vrh elektrode potrebno je izbrusiti pod točno određenim kutom i na što finijoj brusnoj ploči, te kasnije po mogućnosti ispolirati prethodno nabrušenu površinu. Pri tome je poželjno da se brusna ploča koja se koristi za brušenje volframovih elektroda ne koristi i za brušenje drugih materijala, kako bi se spriječila njihova kontaminacija. [2, 7]

Na Slici 8. prikazan je pravilan način brušenja volframovih elektroda korištenjem dijamantne brusne ploče.

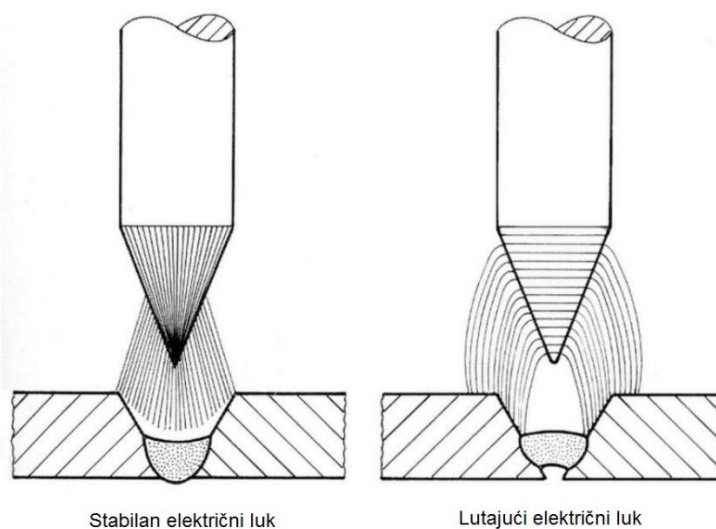


Slika 8. Brušenje volframove elektrode [10]



Slika 9. Izgled pravilno i nepravilno nabrušene volframove elektrode [10]

Način brušenja volframove elektrode bitno utječe na vrstu električnog luka. Pravilnim brušenjem volframovih elektroda, kao što je prikazano na Slici 9., dobiti će se stabilan električni luk kao što je vidljivo na Slici 10. U slučaju nepravilno nabrušene volframove elektrode dobiti će se lutajući električni luk.



Slika 10. Vrste električnog luka ovisno o brušenju volframove elektrode [11]



Promjer elektrode bira se prema debljini materijala odnosno vrsti i jakosti struje zavarivanja. Za zavarivanje aluminija primjenjuje se elektroda većeg promjera nego kod zavarivanja čelika zbog toga što se zavaruje s izmjeničnom strujom pa je elektroda jače toplinski opterećena nego što je to slučaj kada se zavaruje s istosmjernom strujom kad je elektroda na minus polu. Kod promjene promjera elektrode mijenja se stezna cjevčica za koju je pričvršćena elektroda u pištolju.

Kod namještanja elektroda u pištolj za zavarivanje, vrh elektrode mora biti pozicioniran 3 - 5 mm izvan sapnice, a ponekad i do 12 mm ovisno o jakosti struje zavarivanja i obliku samog spoja koji se zavaruje.

Onečišćenost i oštećenost vrha elektroda može se javiti uslijed preopterećenosti elektrode strujom zavarivanja, slabe zaštite vrha elektrode od oksidacije zbog nedovoljnog korištenja zaštitnog plina, doticanjem vrha s osnovnim materijalom, talinom ili dodatnim materijalom. Kada su svi uvjeti zadovoljeni vrh elektrode je čistog metalnog sjaja bez oštećenja. Čim se vrh elektrode dovede u spoj s metalom koji se zavaruje on se kontaminira volframom i ošteti. Ako je vrh elektrode onečišćen samo stranim metalom (pogotovo u manjim količinama) može se očistiti uspostavljanjem električnog luka na pomoćnoj pločici (kratko vrijeme dok strani metal ne ispari). U slučaju da je vrh elektrode taman ili bez sjaja elektroda je preopterećena jakošću struje zavarivanja pa stoga treba uzeti veći promjer elektrode. Kod slučajeva gdje je vrh elektrode plav ili plavo crvenkast, to je indikacija da elektroda nema dobru zaštitu plinom. Nakon prekida luka zaštitni plin mora još neko vrijeme izlaziti i to ne samo radi zaštite taline nego i zbog zaštite vrha elektrode od naglog hlađenja i oksidacije. Stoga zaštitni plin treba nakon gašenja električnog luka naknadno istjecati 1 sekundu za svakih 10 A jakosti struje kojom je provedeno zavarivanje. [1]

## 2.6. Zaštitni plinovi

Zadatak zaštitnog plina jest osiguravanje prikladne atmosfere koja se može lagano ionizirati i dobro štititi vrh elektrode i talinu od kontaminacije kisikom i drugim plinovima iz okoline. U tu se svrhu koriste inertni plinovi, a najčešće korišteni su: argon (Ar), helij (He) vodik ( $H_2$ ), dušik ( $N_2$ ) i njihove mješavine.

Kao najvažnije funkcije koje zaštitni plin ima prilikom postupka zavarivanja mogu se navesti sljedeće: [12]

- Zaštita rastaljenog metala od plinova iz atmosfere (kisika, dušika)
- Podržavanje plazme električnog luka
- Povećanje stabilnosti električnog luka
- Utjecaj na oblik i dubinu penetracije zavora
- Utjecaj na estetski izgled samog zavora
- Utjecaj na razinu para prilikom zavarivanja

Upotrebom optimalnog zaštitnog plina, ovisno o parametrima i vrsti zavarivanja može se poboljšati kvaliteta zavora i smanjiti troškove zavarivanja.

Utjecaj vrste zaštitnog plina na električni luk je značajan s obzirom na fizikalne karakteristike plina (ionizacijski potencijal, toplinska vodljivost, disocijacija i rekombinacija, čistoća plina i gustoća plina).

Ionizacijski potencijal je energija, izražena u elektron voltima (eV), potrebna za uzimanje jednog elektrona od atoma plina i pretvaranja tog atoma u ion. Vrijednost potencijala ionizacije smanjuje se kako se molekularna masa plina povećava. Ionizacijski potencijal ima također veliki utjecaj na uspostavu na stabilnost električnog luka.

Toplinska vodljivost pokazuje kako pojedini plin provodi toplinu. Utječe na radijalni gubitak topline od centra prema rubovima električnog luka, kao i na prijenos topline između plazme i rastaljenog metala. Prema tome, plin koji ima veću toplinsku vodljivost vodi toplinu prema van iz jezgre, što rezultira širom jezgrom električnog luka, te višom temperaturom jezgre električnog luka.

Zaštitni plinovi čije su molekule građene od više atoma (vodik, kisik) prilikom zagrijavanja na visoke temperature unutar električnog luka razbijaju se ili disociraju u atome od kojih su građene molekule. Atomi su nakon toga barem djelomično ionizirani, te tvore slobodne elektrone i protok struje. Kada disocirani plin dođe u kontakt s relativno hladnom površinom radnog komada, atomi se rekombiniraju i otpuste toplinu. Ta toplina rekombinacije uzrokuje da se prividno čini kako zaštitni plin ima višu toplinsku vodljivost.

Ovisno o tome koji metal se zavaruje, i koja se tehnologija zavarivanja koristi, vrlo male količine nečistoća u zaštitnome plinu mogu značajno utjecati na brzinu zavarivanja, ponašanje taline, skrućivanje zavora i poroznost zavora. Uvijek postoji mogućnost da je plin, već prilikom punjenja u bocu kontaminiran nečistoćama; međutim, veća je vjerojatnost da će nečistoće ući negdje između spremnika plina (plinske boce) i pištolja za zavarivanje. Iz tog je razloga potrebno obratiti pažnju na pravilno konstruiranje ventila i sustava za provođenje plina do zavora (cijevi, pištolj za zavarivanje).

Neki metali, kao npr. ugljični čelik imaju visoke tolerancije na čistoću plina, dok npr. titan traži zaštitne plinove vrlo visoke čistoće, budući da oni imaju vrlo niske tolerancije na čistoću zaštitnog plina.

Gustoća plina je masa plina po jedinici volumena. Gustoća je jedan od glavnih faktora koji utječu na efikasnost zaštitnog plina. Načelno, da bi osigurali adekvatnu zaštitu taline zavora, plinovi teži od zraka, kao što su argon i ugljični dioksid, trebaju manji protok plina prilikom zavarivanja, nego što je potrebno kod lakših plinova, kao što je npr. helij. [12]

Argon je najčešće upotrebljavani zaštitni plin kod TIG zavarivanja, a dobiva se iz atmosfere odvajanjem od ukapljenog zraka. To je inertni plin, a karakterizira ga niska toplinska vodljivost. Loše provođenje topline rezultira kompaktnijim električnim lukom veće gustoće

(gustoća električnog luka utječe na koncentraciju energije u električnom luku). Kod zavarivanja argonom energija je usmjerena na usko područje. Time se dobije mala dubina penetracije i manje protaljivanje, što je korisno kod zavarivanja tankih materijala, te zavarivanja u prisilnim položajima (zbog manjeg tečenja taline).

Malog je ionizacijskog potencijala (15,7 eV), što znači da može lako pretvoriti atome u ione što osigurava dobro uspostavu električnog luka i veliku stabilnost električnog luka prilikom zavarivanja istosmjernom strujom elektrodom na negativnom polu, te jako dobro čišćenje oksidnog sloja prilikom upotrebe izmjenične struje. [12]

Prilikom zavarivanja važna je čistoća argona, a ona iznosi minimalno 99,95 %, što znači da se u boci plina argona smije nalaziti maksimalno 0,05 % nečistoća. Ta vrijednost je prihvatljiva za većinu metala koji se zavaruju TIG zavarivanjem, međutim prilikom zavarivanja vatrootpornih i reaktivnih (titan, molibden, tantal) metala minimalna čistoća argona iznosi 99,997 %. [13]

Helij je inertni plin vrlo male mase, a dobiva se odvajanjem od zemnog plina. Čistoća samog helija prilikom zavarivanja iznosi najmanje 99,99 %. Veće je toplinske vodljivosti od argona, pa ima i širi električni luk. Toplina iz središta električnog luka se može brže prenijeti do površine radnog komada, odnosno zavar, što rezultira većom dubinom penetracije i većom količinom topline unesene u zavar. To može biti korisno kod zavarivanja metala koji imaju veliku toplinsku vodljivost (bakar), budući da brže odvede toplinu, te kod primjene mehaniziranih uređaja za zavarivanje kod zavarivanja velikim brzinama.

Većeg je ionizacijskog potencijala (24,5 eV) od argona, što rezultira težom uspostavom električnog luka, naročito kod manjih jakosti električne struje.

Budući da helij ima malu masu, potrebne su veće brzine protoka plina (otprilike tri puta veće nego kod argona). Time se dolazi do veće potrošnje samog plina, te je potrebno dobro ocijeniti da li se isplati upotreba helija. [13]

Česta je i kombinacija argona i helija, s ciljem povećanja brzine zavarivanja i penetracije u odnosu na TIG zavarivanje u zaštiti argona.

Vodik je plin najmanje mase, ima najveću toplinsku vodljivost, te se toplina može velikom brzinom prenijeti do zavar kroz električni luk. Time se dobiva veća penetracija, te čišći zavar.

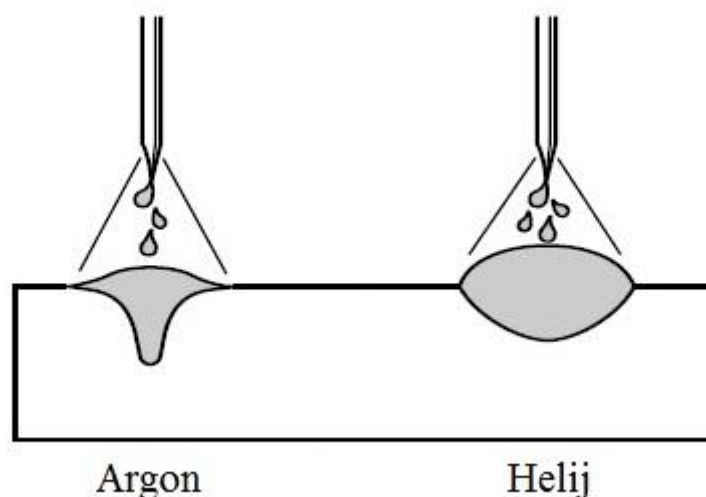
Koristi se u kombinaciji s argonom prilikom zavarivanja austenitnih čelika i niklenih legura. Potrebno je biti posebno oprezan prilikom zavarivanja s dodatkom vodika, budući da je moguća pojava vodikove poroznosti u zavaru. Zato se izbjegava zavarivanje u više prolaza i količina vodika u mješavini iznosi do 15%. [12]

Dušik ima veću toplinsku vodljivost od argona. Upotrebljava se u kombinaciji s argonom (do 3% dušika) i to obično kod zavarivanja metala koji imaju visoku toplinsku vodljivost. Međutim mješavine se dušika upotrebljavaju za zavarivanje samo nekih metala kao što su duplex čelici (stvaranje austenitne strukture dodatkom dušika) i austenitni čelici, te niklenih legura, jer kod ostalih metala izrazito povećava mogućnost stvaranja pukotina. [13]

Izbor količine zaštitnog plina ovisi o jakosti struje zavarivanja, vrsti metala kojeg se zavaruje, vrsti zaštitnog plina, položaju zavarivanja i obliku spoja. Prevelika količina zaštitnog plina osim neekonomičnosti djeluje i štetno jer stvara prejak protok i uzrokuje vrtloženje plina, što smanjuje zaštitu taline te dolazi do uvlačenja zraka u takav (turbulentan) proces. Premala količina zaštitnog plina ne može istjerati sav zrak s mjesta zavarivanja.

U počecima zavarivanja u atmosferi zaštitnog plina uobičajeno je bilo korištenje samo nekoliko plinova, najčešće argona kod TIG i MIG postupka, te ugljičnog dioksida kod MAG postupka zavarivanja. Danas se uglavnom koriste mješavine plinova koje imaju pozitivan utjecaj na kvalitetu i izgled zavarenog spoja. Tako se danas koristi:

- Argon - najčešće korišteni zaštitni plin koji se primjenjuje za zavarivanje konstrukcijskih čelika, nehrđajućih čelika, aluminija i titana
- Argon + Vodik (2% – 5%) – ta mješavina prilikom zavarivanja ima reducirajući efekt, što omogućuje bolji izgled zavara bez površinske oksidacije. Električni luk je uži, ima veću energiju te omogućava veće brzine zavarivanja. Nedostatak ove mješavine s dodatkom vodika je mogućnost pojave vodikom uzrokovanih pukotina i poroznosti kod aluminija.
- Argon + Helij (do 50%) – helij utječe na povećanje energije električnog luka što mu omogućava veće brzine zavarivanja i bolju penetraciju. Veliki nedostatak ove mješavine je visoka cijena i poteškoće tijekom uspostavljanja električnog luka. Koristi se za zavarivanje aluminija, magnezija i bakra, jer povećani unos topline umanjuje efekt toplinske vodljivosti tih materijala.
- Argon + Dušik (1% – 3%) – zavarivanje duplex i austenitnih čelika te Ni-legura
- Argon, Dušik, Dušik/Vodik – koriste se za zaštitu korijenja zavara



Slika 11. Oblik i učinak električnog luka kod helija (He) i argona (Ar) [12]

## 2.7. Zavarljivost visokolegiranih Cr-Ni čelika TIG postupkom

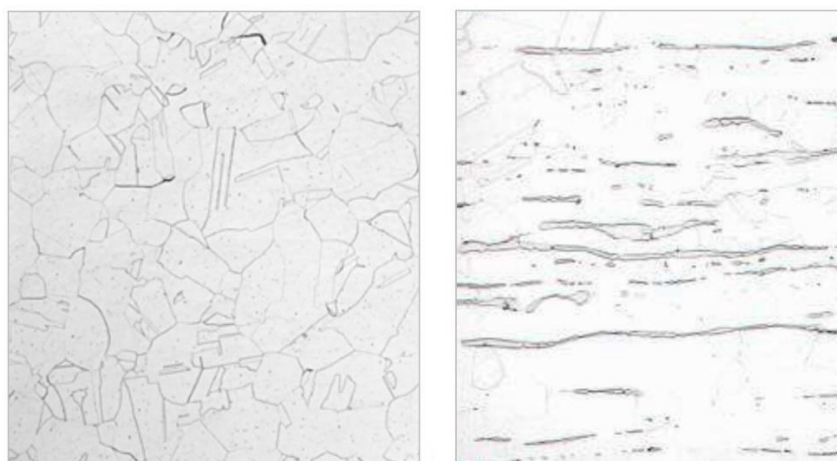
Razvoj i primjena visokolegiranih čelika započinje početkom 20. stoljeća. Patentirao ih je 1912. godine poznati proizvođač čelika Krupp. Od tog razdoblja pa sve do danas, ti se materijali konstantno razvijaju, ovisno o potrebama primjene. U početku im je najčešća primjena bila u priboru za jelo, a zatim u petrokemijskoj industriji.

Postoji nekoliko podjela nehrđajućih čelika od kojih je najbitnija podjela prema strukturi. Tako se visokolegirani čelici prema strukturi materijala dijele na:

- feritne čelike,
- austenitne čelike,
- martenzitne čelike,
- feritno – austenitne (Duplex) čelike.

Danas postoje novije skupine ovih čelika kao što su super i meko martenzitni čelici kojima se legiranjem poboljšavaju svojstva. Prema primjeni visokolegirani čelici se dijele na korozijski postojeane, vatrootporne, alatne i dr.

Austenitni čelici se danas nalaze na prvom mjestu po ukupnoj proizvodnji i po broju različitih vrsta, karakterizira ih niska čvrstoća i visoka duktilnost te visoka otpornost na rupičastu, napetosnu i interkristalnu koroziju (osim u zoni utjecaja topline). Austenitni čelici najčešće sadrže 0,02% – 0,08% C, 16% – 26% Cr, 8% – 35% Ni uz moguće dodavanje molibdena, titana, niobija, tantala, dušika. Svi dodaci, osim dušika, dovode do pojave ferita u mikrostrukturi. Dodatkom nikla i dušika djeluje se na proširenje područja austenita te na snižavanje temperature početka stvaranja martenzita. Austenitni čelici mogu prijeći u martenzitno stanje „dubokim“ hlađenjem ili hladnom deformacijom. Mikrostruktura austenitnih čelika može biti monofazno austenitna ili austenitno – feritna (s 5% – 10% delta ferita). Delta ferit negativno djeluje na ponašanje čelika pri toploj preradi (valjanje, kovanje), ali je ipak nužan radi otežavanja nastanka toplih pukotina. Mikrostruktura austenitnog čelika prikazana je na Slici 12. [15]



Slika 12. Mikrostruktura austenitnog čelika: potpuni austenit slika lijevo, austenit i delta ferit slika desno [15]

Osnovni zahtjevi prema kemijskom sastavu za postizanje austenitne mikrostrukture su:

- maseni udio ugljika treba biti što niži ( $< 0,15\%$ ) jer je tada manja opasnost nastanka karbida  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  koji je uzrok pojave interkristalne korozije,
- maseni udio kroma što viši ( $> 18\%$ ) radi povećanja antikorozivnosti,
- maseni udio nikla što viši ( $> 8\%$ ) kako bi nikal kao gamageni element, prevladao alfageno djelovanje kroma i doveo do nastanka austenitne mikrostrukture,
- dodatno legiranje s molibdenom, titanom, niobijem i/ili tantalom koji pospješuju nastanak  $5\% - 10\%$  delta ferita te djeluju stabilizirajuće na otpornost prema interkristalnoj koroziji,
- povišeni udjel dušika ( $0,2\% - 0,4\%$ ) radi povišenja čvrstoće i otpornosti na napetosnu i jamičastu koroziju.

Poznato je da toplinska obradba utječe na svojstva upotrebe i prerade, a time i na mogućnost primjene čelika. Austenitni čelici nisu sposobni da se zakale ili poboljšaju transformacijom jer nema faznih transformacija.

Glavni problem u pogledu korozijske otpornosti predstavlja karbid  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  čiji se nastanak može izbjeći jakim karbidotvorcima koji stvaranjem karbida onemogućavaju spajanje ugljika s kromom te na taj način sprječavaju osiromašenje perifernih zona austenitnih zrna.

Najčešće primjenjivani čelici s niskim sadržajem ugljika su AISI 304L, AISI 316L, AISI 316LC. [15]

Austenitni čelici dobro su zavarljivi (uz iznimku čelika koji sadrže sumpor ili selen - čelici za strojnu obradu). Ne treba ih predgrijavati prije zavarivanja. Najveći problem predstavlja mogućnost senzibilizacije tj. precipitacije kromovih karbida u temperaturnom rasponu od  $425 - 850^\circ\text{C}$ , što može dovesti do pojave interkristalne korozije. Zavarljivost ovih konstrukcijskih materijala traži odgovarajuću tehnološku razinu i disciplinu, a treba voditi računa i o povećanoj sklonosti deformacijama. Naime, visoki koeficijent toplinske istezljivosti, te sniženi koeficijent toplinske vodljivosti rezultiraju povećanom sklonošću ka deformacijama kao posljedica zavarivanja. Skloni su pojavi toplih pukotina u metalu zavara, što se javlja s jedne strane kao posljedica nečistoća u materijalu, te uslijed izražene sklonosti deformacijama odnosno zaostalim naprezanjima. Problem je danas uglavnom riješen pravilnim odabirom dodatnih materijala ( $4\% - 12\%$  delta ferita) te samom tehnikom kao i ostalim uvjetima zavarivanja. [16]

### 3. Stanice za TIG zavarivanje

#### 3.1. Uvod

Široki asortiman proizvoda i povećanje konkurentnosti na tržištu zahtijevaju uvođenje fleksibilne proizvodnje, što bi trebalo omogućiti povećanu produktivnost, smanjene troškove i visoku razinu kvalitete. Postoje dva rješenja: automatizacija ili robotizacija zavarivanja. Ovisno o raznim faktorima, među kojima je važniji vrsta proizvodnje (maloserijska ili velikoserijska proizvodnja) ovisit će koja će se od ove dvije opcije odabrati. Tehnički zahtjevi za automatizaciju i robotizaciju prikazani su u Tablici 3.

Tablica 3. Tehnički zahtjevi i njihovo zadovoljavanje u automatizaciji i robotizaciji zavarivanja

Zahtjevi	Automatizacija zavarivanja	Robotizacija zavarivanja
Visoka kvaliteta	DA	DA
Točnost/ponovljivost	DA	DA
Fleksibilnost	NE	DA
Ergonomija	DA	DA
Jednoličnost posla	DA	DA
Mogućnost zavarivanja	DA (djelomično)	DA
Visoka produktivnost	DA	DA
Visoka iskoristivost	DA	DA
Pouzdanost	DA	DA
Minimiziranje pripremno-završnog vremena za novi proizvod	NE	DA
Niska investicijska ulaganja	DA (djelomično)	NE

Dodatni kriteriji koji bi pogurnuo odluku prema smjeru robotizacije zavarivanja je prostorno zavarivanje, koje je teško izvesti s automatiziranim sustavima zavarivanja s tri stupnja slobode gibanja (x, y i z osi). [17]



Slika 13. Primjer robotiziranog (lijevo) i automatiziranog (desno) zavarivanja [17]

### 3.2. Robotizacija zavarivanja

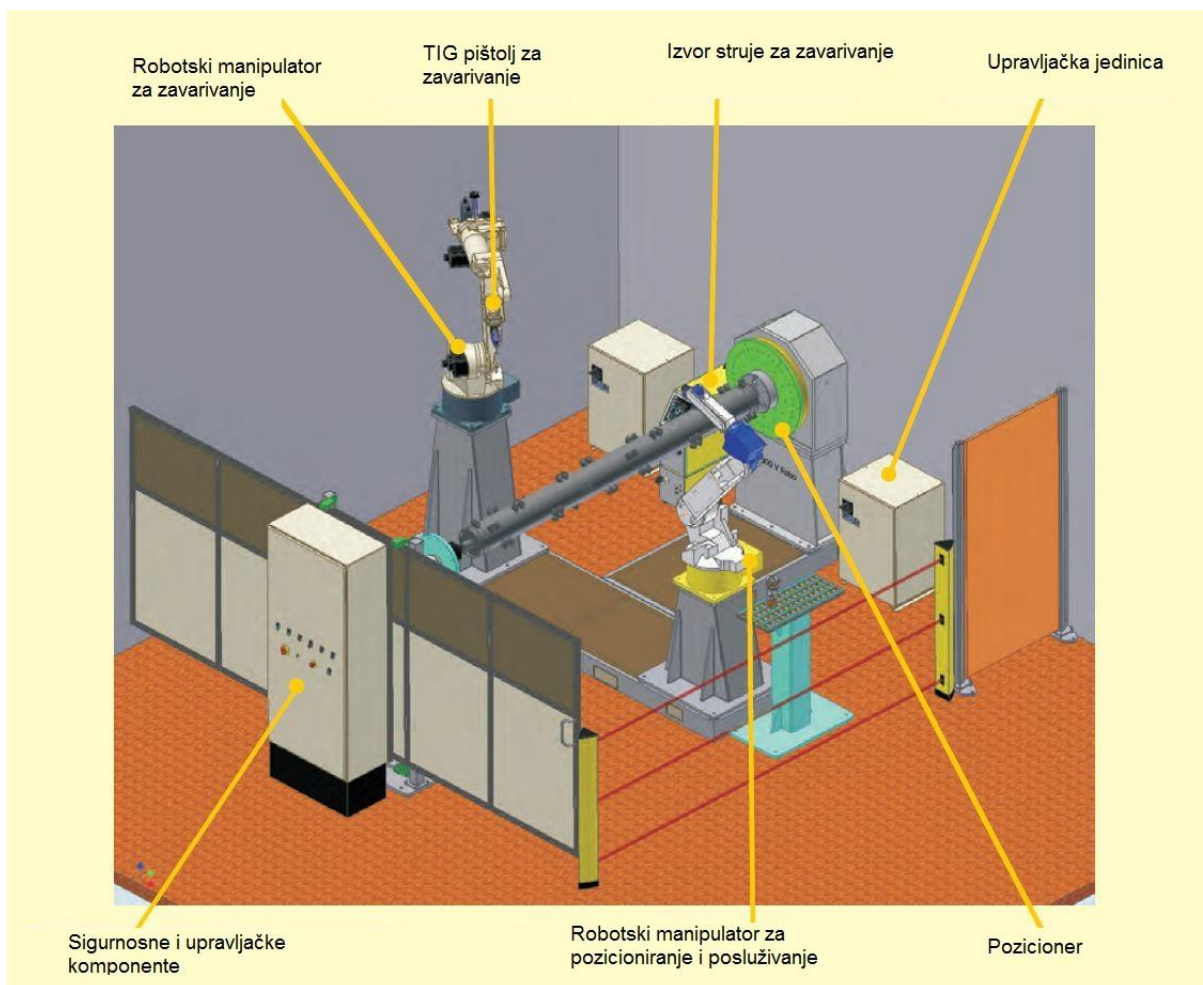
Glavni je cilj primjene robota za zavarivanje podizanje produktivnosti uz istovremeno podizanje kvalitete zavarivanja. Također cilj je i maknuti ljude iz prostora nezdrave atmosfere, visoke temperature, visoke razine buke i sl. Kod robotiziranog postupka zavarivanja pištolj je najčešće smješten na zadnjoj osi-članku robota, iz razloga kako bi se omogućilo što lakše i jednostavnije praćenje željene putanje pištolja u odnosu na radni komad. Visoka ponovljivost i fleksibilnost robota omogućuje visoku kvalitetu i ekonomičnost izvedbe zavara/navara. Jedna od najvažnijih značajki i prednosti robota u odnosu na ljudskog operatera mogućnost je fleksibilnog i simultanog pokretanja više osi simultano kako bi postigao i ostvario zadanu putanju kompleksnog radnog komada (cijevi izmjenjivača, parni kotlovi, složene rešetkaste konstrukcije i sl.), a primjenom robota raste pouzdanost procesa što garantira kvalitetniji i pouzdaniji zavar.

Kako postići kvalitetno zavaren/navaren spoj radnih komada slobodnog oblika veoma je interesantna tema većine znanstvenih radova. Zadanu kvalitetu, debljinu, hrapavost, čvrstoću, poroznost i sl. nemoguće je ostvariti ako se ne primjene roboti u samom procesu zavarivanja. Veliku ulogu u ostvarivanju ovih zadanih ciljeva ima i trajektorija/putanja po kojoj će robot provesti postupak zavarivanja.

Prije uvođenja robotiziranog zavarivanja, prvo je potrebno provesti analizu potencijalnih proizvoda, odrediti dimenzije proizvoda koji će se zavarivati i minimizirati gabarite robotske stanice.

Glavni dijelovi od kojih je sastavljena stanica za robotizirano zavarivanje su sljedeći: robotski manipulator (ruka), izvor struje za zavarivanje s odgovarajućom opremom, pištolj za zavarivanje, upravljačka jedinica za robota, jedinice za pozicioniranje i sigurnosna i druga oprema. Sam robotski sustav neće raditi u skladu sa zahtjevima ako ne postoji odgovarajuća suradnja među sistemskim inženjerima i inženjerima za zavarivanje. Izgled jedne stanice za robotizirano zavarivanje prikazan je na Slici 14. [17]



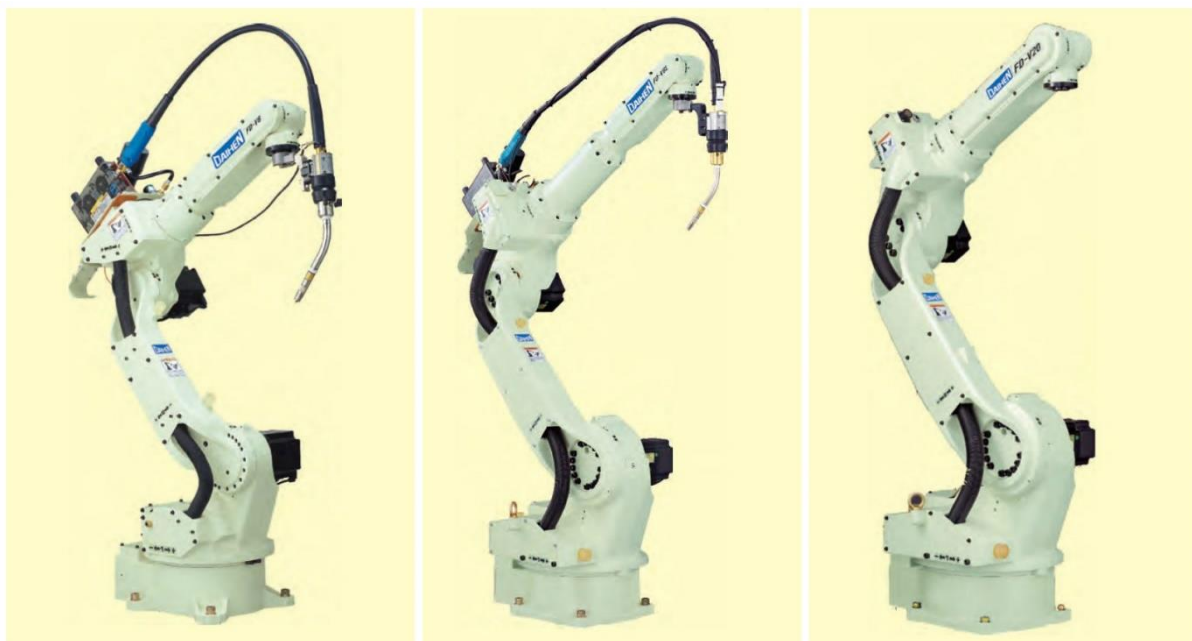


Slika 14. Stanica za robotizirano zavarivanje [17]

### 3.3. Konfiguracije stanice za robotizirano TIG zavarivanje

Svaka stanica za robotizirano TIG zavarivanje sastoji se od osnovnih dijelova koji su prethodno nabrojani, međutim svaki od tih dijelova može se malo razlikovati prema izvedbi s obzirom na namjenu za koju je napravljen.

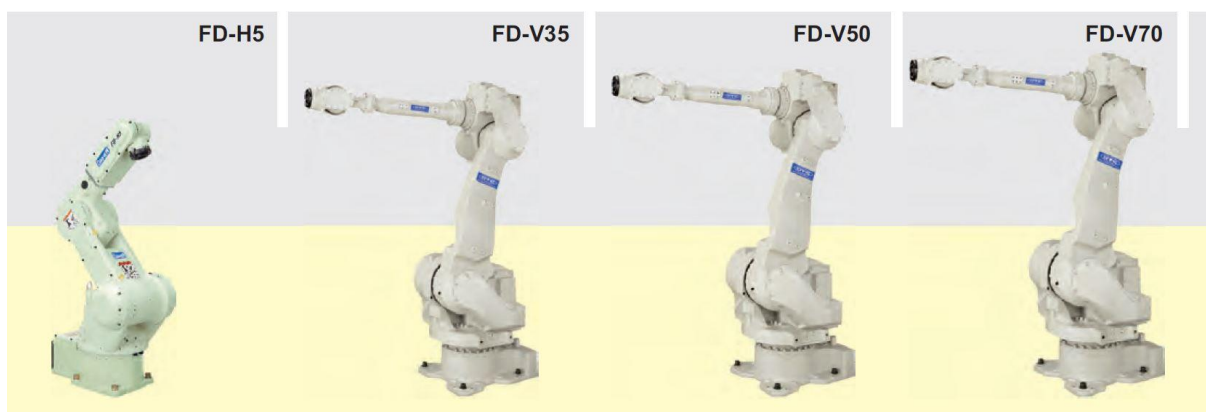
Robotski manipulator glavni je dio svake stanice za zavarivanje. Međusobno se mogu razlikovati prema broju stupnjeva slobode gibanja (najmanje imaju 6 SSG), veličini radnog prostora u kojem mogu djelovati, a samim time i veličini radnog komada kojeg mogu zavarivati. Osim toga razlikuju se i po maksimalnoj nosivosti koja je stoga onda ograničavajući faktor kada je u pitanju izbor pištolja za zavarivanje. Većina robotskih manipulatora namijenjena je ili za posao zavarivanja ili za posao pozicioniranja i posluživanja drugih robotskih manipulatora, dok samo jedan dio može biti korišten u obje svrhe. Takvi su robotski manipulatori obično većih dimenzija i nosivosti. [17]



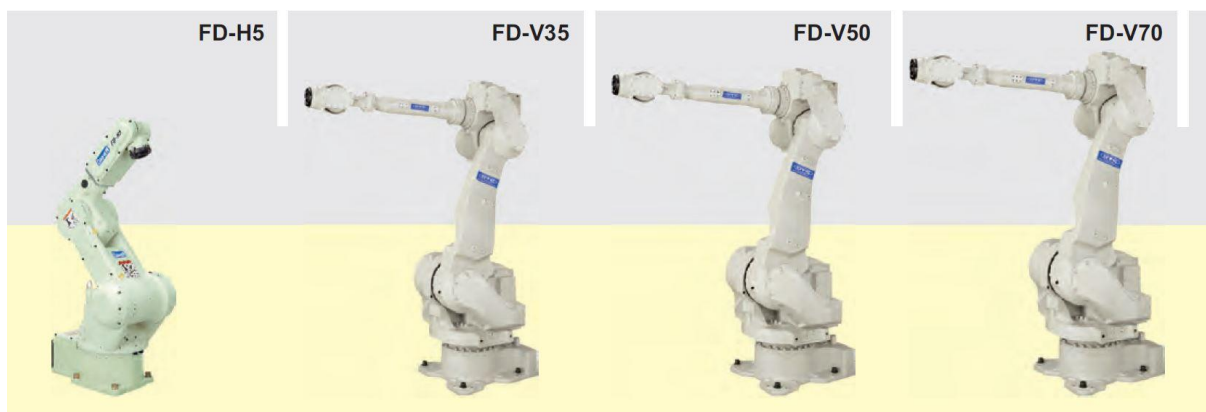
Slika 15. Robotski manipulatori različite veličine [17]

Na Slici 15. prikazani su roboti različite veličine radnog područja i mogućnosti korištenja (zavarivanje – lijevi i sredina, te zavarivanje/pozicioniranje i posluživanje - desno) ali iste nosivosti.

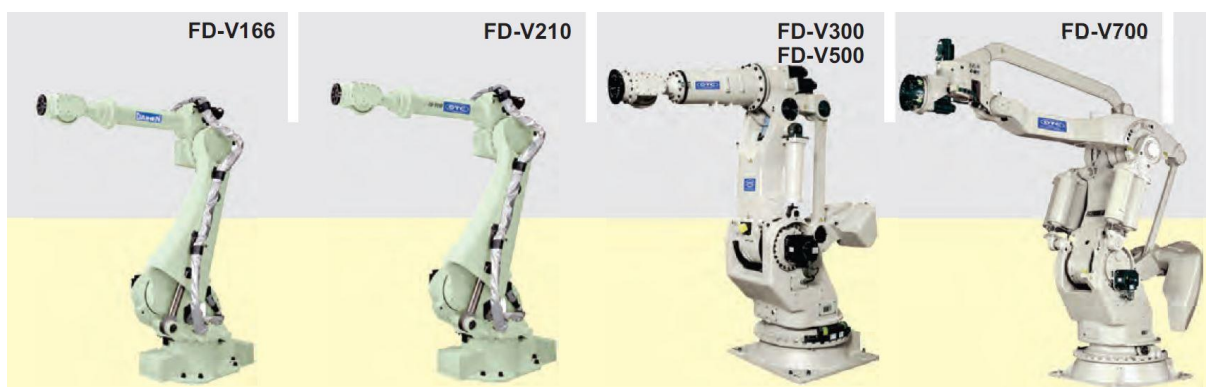
Na Slikama 16., 17., 18. također su prikazani različiti robotski manipulatori koji se razlikuju po nosivosti i broju stupnjeva slobode gibanja.



Slika 16. Robotski manipulatori 1 [17]



Slika 17. Robotski manipulatori 2 [17]



Slika 18. Robotski manipulatori 3 [17]

Upravljačke jedinice međusobno se razlikuju po dimenzijama, priključnoj snazi, kapacitetu memorije (broj PTP komandi i broj spremljenih programa), načinu komunikacije s korisnikom (privjesak za učenje, programiranje putem računala...) i sl. [17]



Slika 19. Upravljačka jedinica i privjesak za učenje [17]

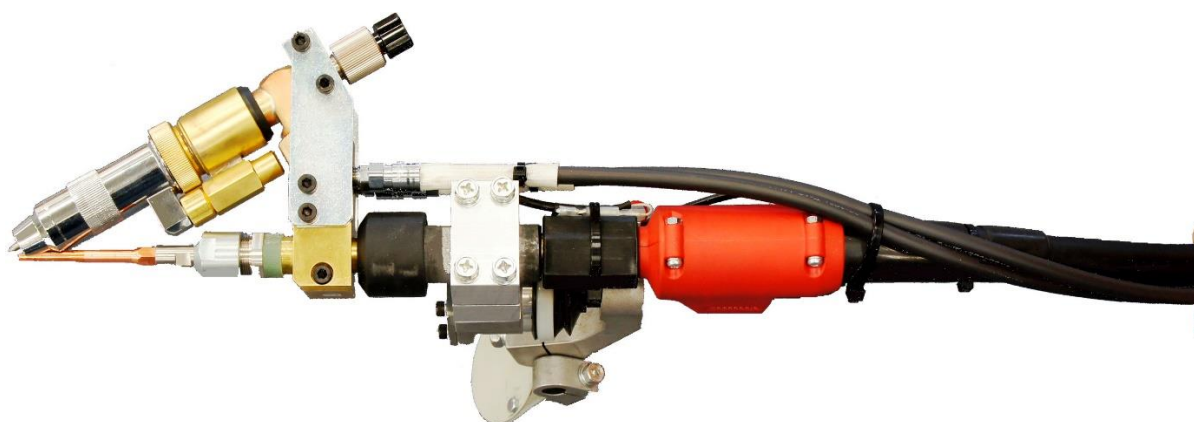
Kod robotskog zavarivanja izvor struje za zavarivanje zapravo je vrlo sličan izvoru struje kakav se koristi kod ručnog postupka zavarivanja. Međutim, kod robotiziranog zavarivanja izvor struje je povezan s upravljačkom jedinicom čime je omogućena neprekidna komunikacija, konfiguracija i kontrola parametara zavarivanja. Svi se parametri zavarivanja unose preko upravljačke jedinice (npr. privjesak za učenje), čime se značajno olakšava programiranje iznimno zahtjevnih postupaka zavarivanja. Osim toga u sustav je integriran nadzor parametara zavarivanja i upravljanja listama pogrešaka (engl. error list).

Izvori struje zavarivanja međusobno se razlikuju prema jakosti struje zavarivanja koju mogu dostaviti, intermitenciji, vrsti postupka za koji su namijenjeni i vrsti pištolja za zavarivanje (zračno ili vođeno hlađenje pištolj). Osim toga mogu se razlikovati i po količini parametara koje korisnik može sam mijenjati. [17]



Slika 20. Izvori struje za robotsko zavarivanje [17]

Pištolji za zavarivanje međusobno se razlikuju prema veličini i obliku, ovisno o njihovoj namjeni. Također, razlikuju se i po načinu hlađenja pištolja – zračno ili vođeno hlađenje, maksimalnoj jakosti struje za koju su namijenjeni, promjeru elektrode (promjer žice kod MIG/MAG, odnosno promjer volframove elektrode kod TIG postupka) i intermitenciji. Kod TIG pištolja za zavarivanje postoje 2 osnovne vrste – s ili bez automatskog dodavanja dodatnog materijala. [17]

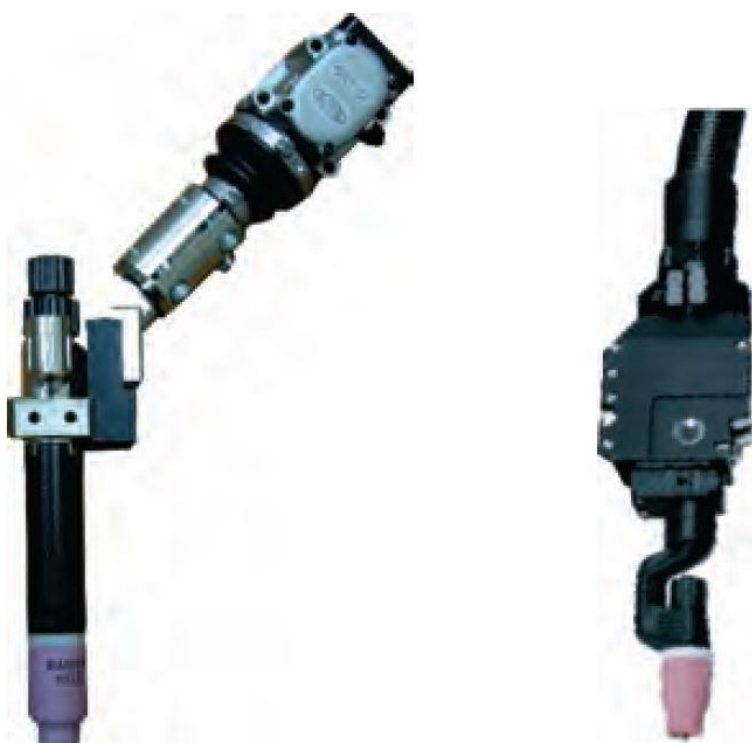


Slika 21. Pištolj za robotizirano TIG zavarivanje s automatskim dodavanjem dodatnog materijala 1 [18]





Slika 22. Pištolj za robotizirano TIG zavarivanje s automatskim dodavanjem dodatnog materijala 2 [19]



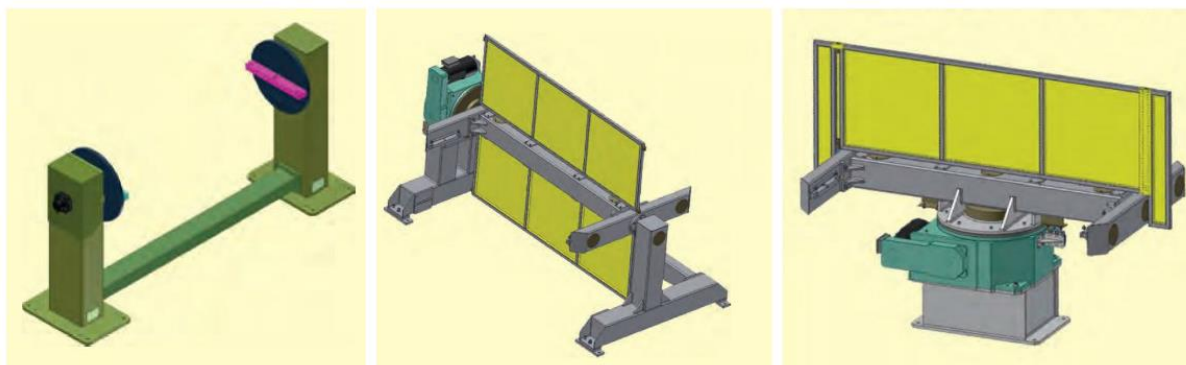
Slika 23. Pištolj za robotizirano TIG zavarivanje bez automatskog dodavanja dodatnog materijala [17]

Posljednji sastavni dio čine jedinice za pozicioniranje i posluživanje. Postoje više vrsta ovakvih jedinica, a grubo se mogu podijeliti u okretne pozicionere, okretno-nagibne pozicionere i pokretne trake. Projektiraju se za različite nosivosti radnih komada. Osim toga okretni i okretno-nagibni pozicioneri mogu biti ručni ili automatski upravljani.

Robotizirani okretni pozicioneri mogu biti u jednostrukoj ili dvostrukoj izvedbi (samo je jedna strana pogonska, a međusobno su povezane ojačanjima), a mogu se pojaviti u horizontalnoj i vertikalnoj izvedbi, kao što je prikazano na Slikama 24. i 25. [17]

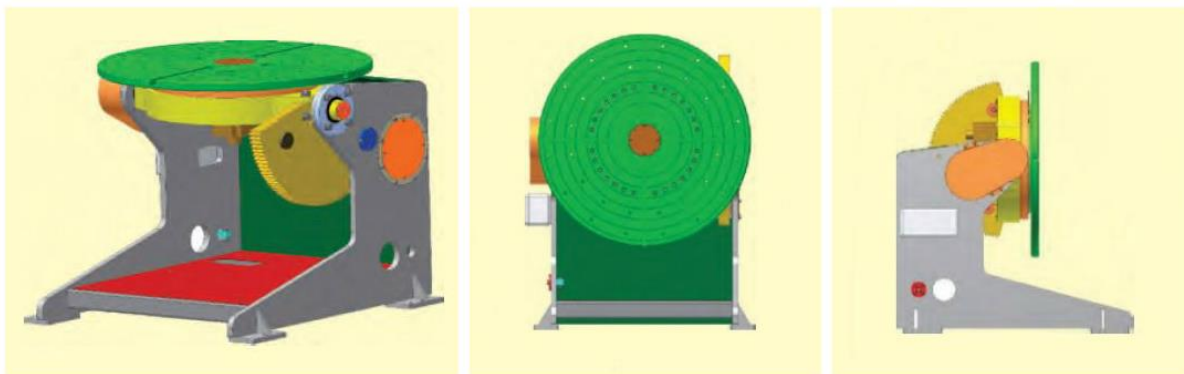


Slika 24. Jednostruki robotizirani okretni pozicioner [17]



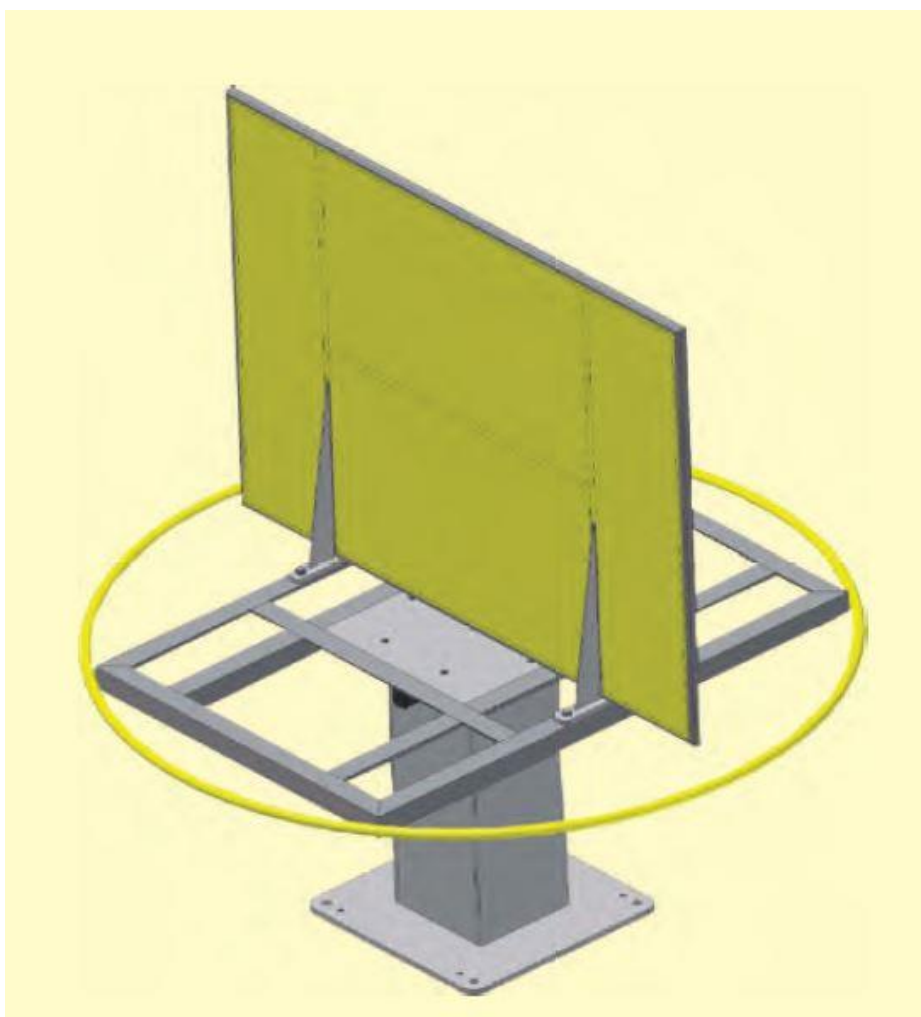
Slika 25. Dvostruki robotizirani okretni pozicioneri (vertikalni - slika lijevo i sredina, horizontalni - slika desno) [17]

Robotizirani okretno-nagibni pozicioneri omogućuju sinkronizaciju gibanja s robotskim manipulatorom, čime se ustvari postiže povećanje broja stupnjeva slobode gibanja i samim time omogućuje zavarivanje složenijih dijelova. Na robotizirani okretno-nagibni pozicioner ne mora se samo montirati radni komad, već se na njega može montirati i sam robotski manipulator. Na Slici 26. prikazan je jedan takav robotizirani okretno-nagibni pozicioner. [17]



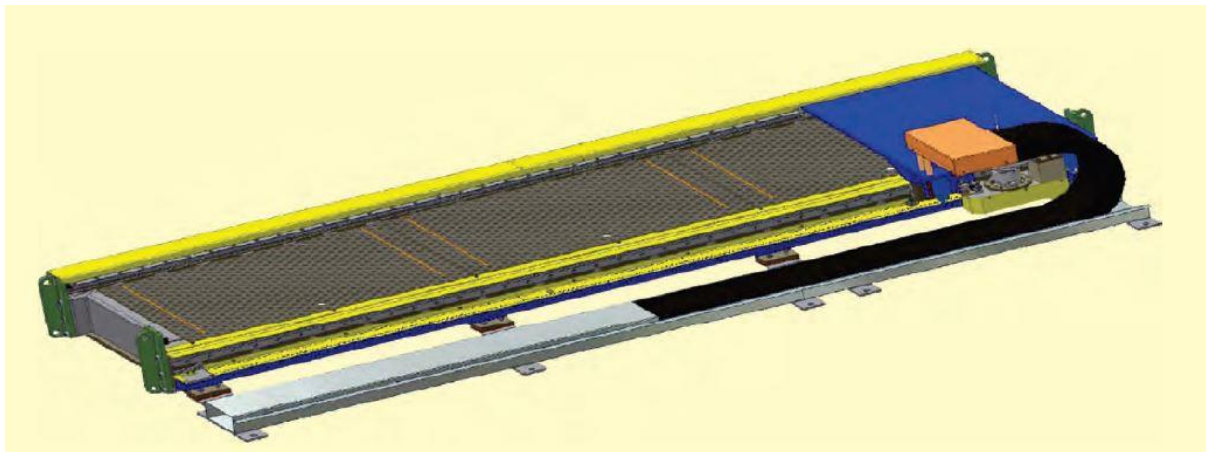
Slika 26. Robotizirani okretno-nagibni pozicioner [17]

Ručni okretni pozicioneri mogu biti izrađeni u vertikalnoj i horizontalnoj izvedbi. Ručnim pozicionerima ne upravlja se preko upravljačke jedinice odnosno privjeska za učenje nego ručno upravljanim elektromotornim pogonom. Ovakvi pozicioneri prikazani su na Slici 27. [17]



Slika 27. Ručno upravljani okretni pozicioner [17]

Pokretne trake skoro su uvijek robotizirane te se njima upravlja preko upravljačke jedinice, tj. preko privjeska za učenje. Gibanje pokretne trake može biti sinkronizirano s gibanjem robotskog manipulatora, čime se dobiva još jedan dodatan stupanj slobode gibanja. Primjer pokretne trake prikazan je na Slici 28. [17]



Slika 28. Pokretna traka [17]

Prilikom procesa zavarivanja dolazi do poteškoća koje otežavaju tijek i izvedbu procesa zavarivanja, a one se najčešće javljaju u obliku: odstupanja u dimenzijama radnog komada, nepravilne pripreme i stezanja radnog komada, utjecaja strojeva i njihovih tolerancija, poremećaja unutar samog postupka zavarivanja, itd.

Navedene poteškoće normalna su pojava u samom procesu ručnog zavarivanja jer jedan zavarivač uz pomoć vizualne kontrole (vizualnih detektora / očiju i mozga) nesvjesno lako uočava probleme i uz pomoć adekvatne tehnike rada i iskustva rješava ih automatizmom (tijekom samog procesa zavarivanja).

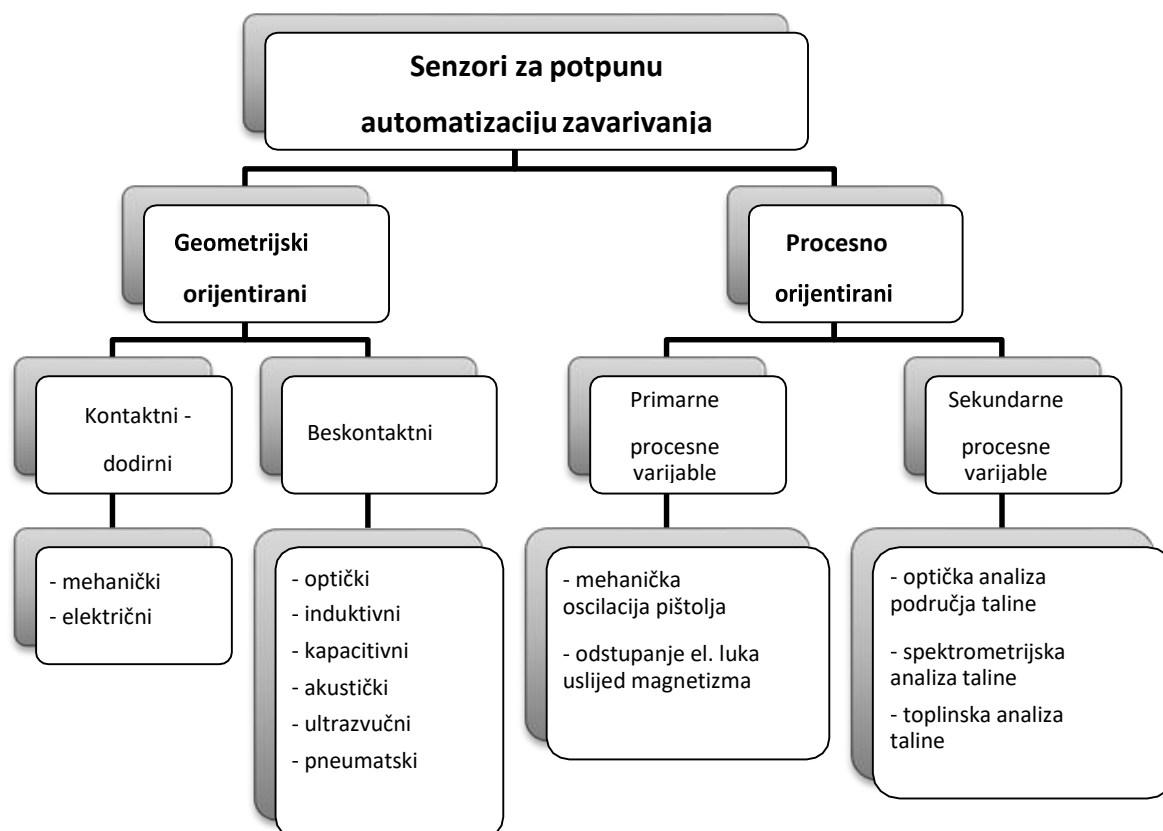
Kod potpuno automatiziranih numerički upravljanih sustava za zavarivanje ovakvi uobičajeni problemi zadaju velike probleme, a njihova detekcija i otklanjanje bez primjene senzora je nezamisliva. Takvi sustavi zahtijevaju visoko organiziranu i definiranu okolinu koja uz pomoć senzora i kontrolnih elemenata zatvara povratnu vezu i čini takav proces zavarivanja ostvarivim.

Idealni senzor za robote može:

- mjeriti i detektirati odstupanja u putanji zavarivanja
- prijevremeno detektirati: kutni spoj, koliziju - sudaranje, početnu i krajnju točku zavara
- biti što manje dimenzije.

Naravno, takav idealni senzor ne postoji; zato je bitno odabrati odgovarajući senzor za odgovarajuću aplikaciju. Slika 29. prikazuje podjelu različitih tipova senzora kod robotiziranog zavarivanja. Senzori prikupljaju informacije o poziciji robota, stanju perifernih jedinica i tijekom procesa te ih šalju u upravljačku jedinicu. Primjenom senzora greške uzrokovane lošom pripremom spoja, nejednakim tolerancijama materijala i nekalibriranim manipulatorom mogu se otkloniti za vrijeme samog procesa robotiziranog zavarivanja kompenzacijom putanje pištolja. Senzori koji se najčešće upotrebljavaju su: kontakti-dodirni, optički i električni. [17]





Slika 29. Senzori koji se primjenjuju kod potpune automatizacije zavarivanja [5]



Slika 30. Mehanički kontaktni senzor (slika lijevo) i senzor za praćenje napona i struje električnog luka prilikom njihanja (slika desno) [17]

## 4. Eksperimentalni dio

Cilj ovog eksperimentalnog rada bio je odrediti utjecaj plinske mješavine He3H1 i 100% Ar na parametre robotiziranog TIG zavarivanja visokolegiranog Cr-Ni čelika, te na temelju analize podataka odrediti optimalne parametre zavarivanja, maksimalnu brzinu zavarivanja i opisati utjecaj brzine na oksidna obojenja.

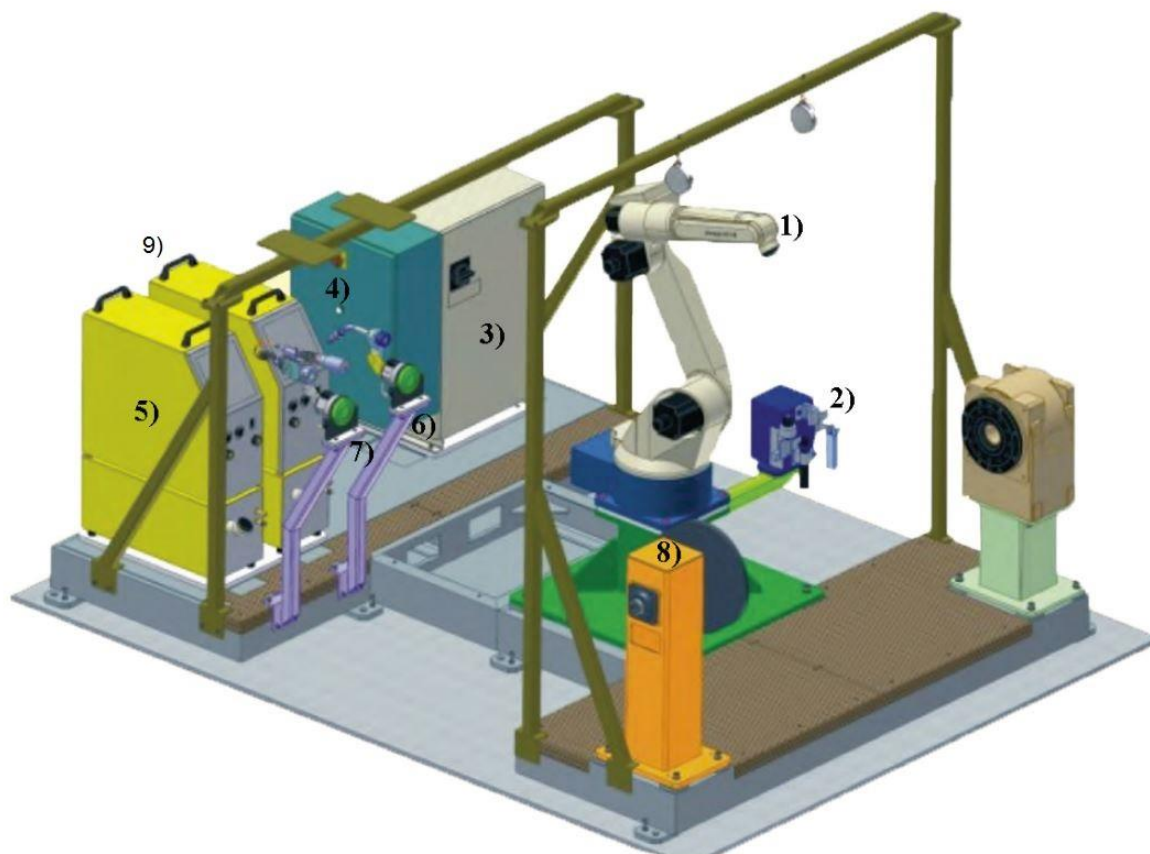
Postupak navarivanja proveden je na ploči visokolegiranog Cr-Ni čelika AISI 304 dimenzija 800x400x4 mm kontinuiranim strujama jakosti 130 A i istim volumnim protocima zaštitnih plinova od 8 l/min, dok se mijenjala brzina zavarivanja. Udaljenost ranog komada i volframove elektrode bila je jednaka pri navarivanju svih uzoraka a iznosila je 4,3 mm. Ispitivanje se provelo s dva različita zaštitna plina i korištenjem četiri različite brzine zavarivanja za svaki zaštitni plin. U tu svrhu definiran je plan pokusa i prikazan je u Tablici 4.

Tablica 4. Plan pokusa

Zaštitni plin	He3H1		100% Ar	
		Uzorak		Uzorak
Brzina zavarivanja 1 [cm/min]	7	1.	7	1.A
Brzina zavarivanja 2 [cm/min]	11	2.	11	2.A
Brzina zavarivanja 3 [cm/min]	15	3.	15	3.A
Brzina zavarivanja 4 [cm/min]	19	4.	19	4.A

### 4.1. Oprema i izvor struje za zavarivanje

Eksperimentalni dio rada proveden je u Laboratoriju za zavarivanje Katedre za zavarene konstrukcije Fakulteta strojarstva i brodogradnje, a korištena je robotska stanica VCR-1G MIG + 1G TIG/1dm, koja je prikazana na Slici 31.



Slika 31. Robotska stanica VCR-1G MIG + 1G TIG/1dm [17]

Sastavni dijelovi ove robotske stanice su sljedeći:

- 1) Robotski manipulator OTC Almega AX-V6
- 2) Uređaj za čišćenje sapnice, rezanje žice i nanošenje sredstva protiv naljepljivanja kapljica
- 3) Električna jedinica
- 4) Upravljačka jedinica
- 5) Izvor struje TIG VARTIG 3500 DC/AC (Varstroj)
- 6) Pištolj za MIG/MAG zavarivanje
- 7) Pištolj za TIG zavarivanje
- 8) Pozicioner Varstroj P250K ROBO
- 9) Izvor struje MIG/MAG VPS 4000 (Varstroj)

## 4.2. Osnovni materijal

Osnovni materijal korišten u ovom eksperimentalnom radu je visokolegirani Cr-Ni čelik AISI 304. To je austenitni nehrđajući čelik dobre čvrstoće i odlične korozijske otpornosti. Toplinska i električna vodljivost nije im izražena u usporedbi s bakrenim legurama i nisu magnetični. Široku primjenu imaju u prehrambenoj (pivovare, vinarije, mljekare) i naftnoj

industriji (spremnici kemikalija), a u novije vrijeme sve se češće primjenjuje u arhitekturi. Razni oblici “pitting“ korozije javljaju se samo u toplim atmosferama s većom koncentracijom klorida. 304L varijanta je s manjim udjelom ugljika i pogodnija je za zavarivanje. U Tablici 5. nalazi se kemijski sastav materijala AISI 304.

Tablica 5. Kemijski sastav čelika AISI 304

	Kemijski element								
	Al	Si	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Mo
Maseni udio [%]	5,75	0,4	0,15	17,71	1,25	67,01	7,17	0,34	0,23
Odstupanje od izmjerenog udjela [%]	0,56	0,05	0,03	0,12	0,06	0,28	0,11	0,03	0,006

Ispitivanje sastava provedeno je u Laboratoriju za zaštitu materijala katedre za zaštitu materijala korištenjem uređaja Olympus Handheld XRF Analyzers DELTA Professional, a primjer postupka ispitivanja prokazan je na Slici 32.



Slika 32. Ispitivanje kemijskog sastava ploče AISI 304

### 4.3. Priprema osnovnog materijala

Čišćenje i priprema površine je važno za kvalitetu navarenog spoja i može se provoditi na sljedeće načine:

- Pomoću četke (obične ili rotirajuće) od nehrđajućeg austenitnog čelika,
- Pjeskarenjem s čistim pijeskom,
- Obradom odvajanjem čestica ili brušenjem (alat ne mora biti od nehrđajućeg austenitnog čelika), a sredstvo za hlađenje ne smije sadržavati klor,
- Kemijskim čišćenjem - nagrivanje se preporučuje u 10 - 20 % dušičnoj kiselini ( $\text{HNO}_3$ ). Odmašćivanje osnovnog i dodatnog materijala prije navarivanja je neophodno kao i odstranjivanje čestica i tragova od premaza i oznaka bojama i markerima. Posebno su opasni halogeni elementi Cl, F, S i niskotaljive legure Pb i metala zbog moguće pojave pukotina i korozije uz naprezanje.

U ovom se eksperimentalnom radu površinska priprema sastojala od brušenja obje strane ploče brusnim papirom, od grubljeg prema finijem (P80, P120, P240), a nakon toga slijedilo je čišćenje etilnim alkoholom kako bi se odstranile sve preostale nečistoće i kako bi se odmastila površina.



Slika 33. Priprema površine osnovnog materijala



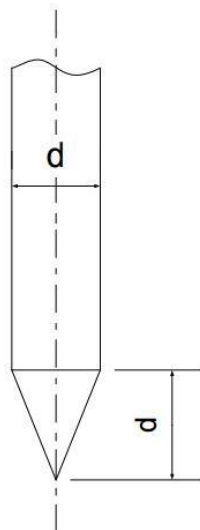
## 4.4. Parametri TIG navarivanja

### 4.4.1. Izbor volframove elektrode

Austenitni čelici zavaruju se istosmjernom strujom s elektrodom na (-) polu, s jačinom struje u rasponu od 70 - 250 A ovisno o debljini materijala.

Za potrebe eksperimenta odabrana je volframova elektroda WL 15 (zlatna) legirana s lantanovim oksidima. Promjer korištene elektrode je  $d = 2,4 \text{ mm}$ , a dodatni materijal se nije koristio. Preporučeni izgled vrha elektrode prikazan je na Slici 34. Udaljenost vrha volframove elektrode od površine radnog komada iznosi 4.3 mm.

Elektroda ovakvog oblika namijenjena je za automatizirano i robotizirano zavarivanje. S obzirom na to da se koristi elektroda spojena na (-) pol kada nema pojave efekta čišćenja, potrebno je prije navarivanja ručno provesti čišćenje površine radnog komada i same volframove elektrode uspostavljanjem električnog luka na pomoćnoj pločici.



Slika 34. Preporučeni izgled volframove elektrode kod automatiziranog TIG navarivanja austenitnih čelika

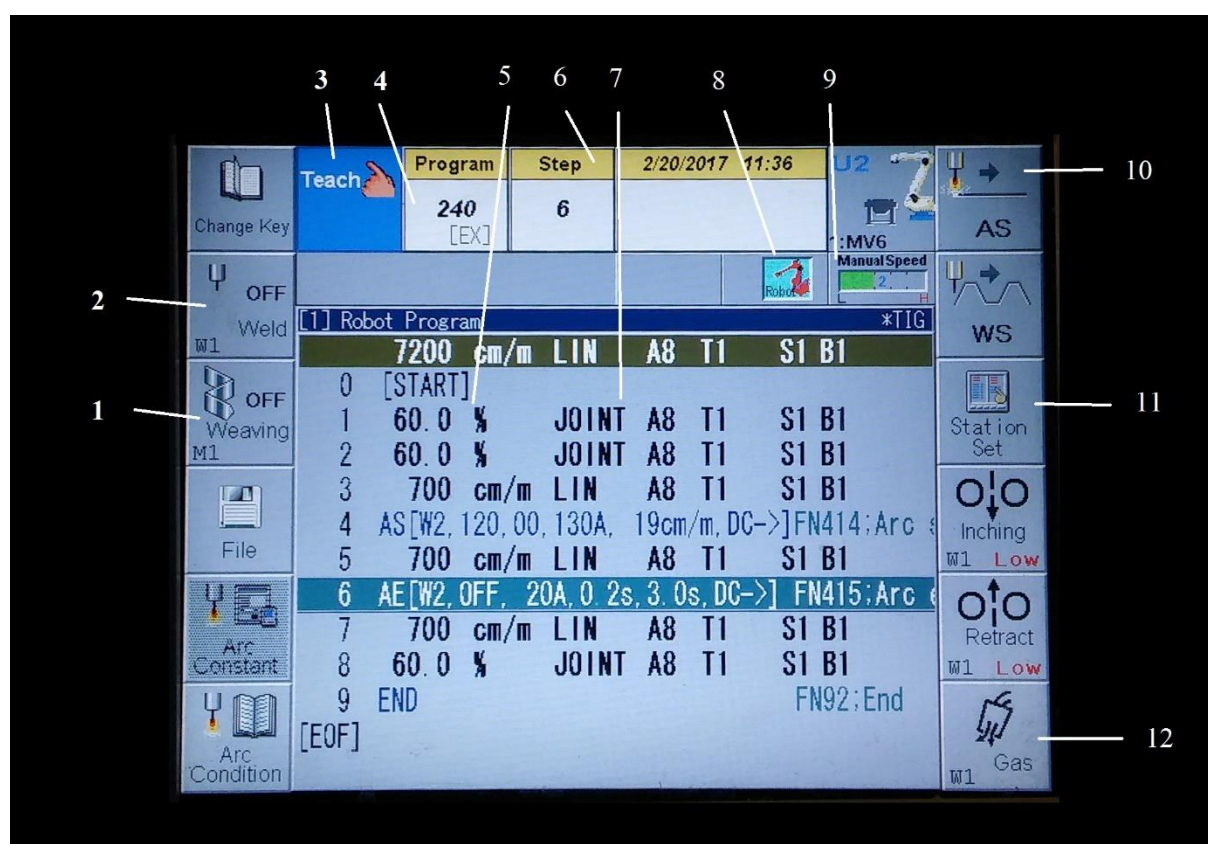
### 4.4.2. Zaštitni plin

Austenitni čelici prilikom navarivanja u zoni utjecaja topline stvaraju okside koji kasnije mogu uzrokovati neki od oblika korozije. Stoga je potrebno osigurati odgovarajući protok inertnog plina, koji će štititi navar tijekom navarivanja od utjecaja vanjske atmosfere. U eksperimentalnom dijelu rada kao zaštitni plinovi korišteni su He3H1 (R1 prema ISO 14175) i čisti Ar (I1 prema ISO 14175). Volumni protok za oba zaštitna plina je jednak, te iznosi 8 l/min.

#### 4.4.3. Izrada programa za robotizirano zavarivanje

Prije izvedbe navarivanja bilo je potrebno izraditi program za robotizirano navarivanje. Program je izrađen u programskom software-u samog robota za zavarivanje, korištenjem privjeska za učenje. Korištena je on-line metoda programiranja. U programu su također definirani parametri za navarivanje (jakost struje zavarivanja i brzina zavarivanja). Na Slikama 35., 36., 37. i 38. je prikazano sučelje koje je korišteno prilikom programiranja robota, te parametri koje je moguće mijenjati prilikom programiranja robota.

Prilikom programiranja težnja je bila napraviti što kraći i efikasniji program robota koji ima što kraća vremena i putanju manipulacije ne ugrožavajući tako najbitniju putanju i parametre navarivanja.

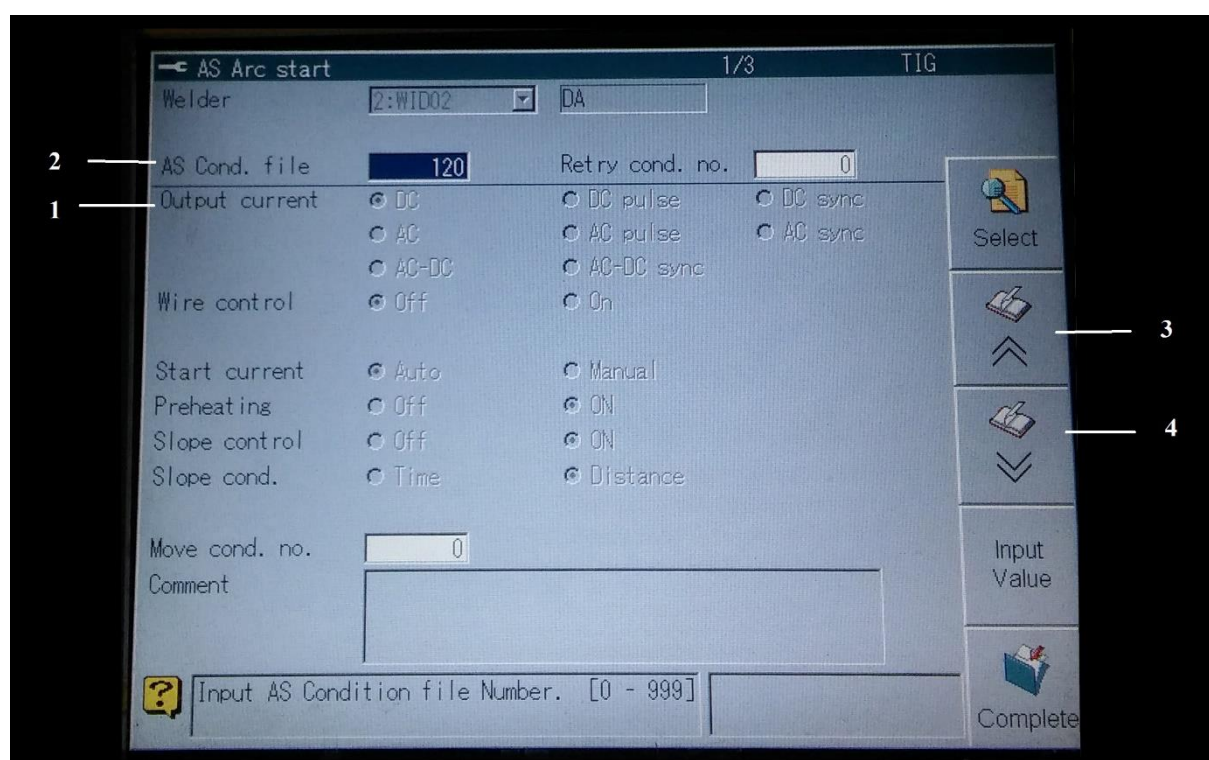


Slika 35. Program za navarivanje

Na Slici 35. označeni parametri su sljedeći:

- 1 Opcija izvođenja zavarivanja s ili bez njihanja pištolja
- 2 Opcija za izvođenje programa s ili bez uspostave električnog luka
- 3 Prikaz jesu li motori robota uključeni/isključeni
- 4 Redni broj trenutnog programa koji je u upotrebi
- 5 Brzina gibanja robotskog manipulatora u automatskom načinu rada izražena kao postotak maksimalne brzine gibanja robotskog manipulatora
- 6 Broj koraka u programu koji je trenutno aktivan

- 7 Vrsta interpolacije koja se trenutno koristi. Moguće je korištenje: joint interpolacije - robotska se ruka kreće slobodno kroz prostor između dvije točke koristeći optimalno proračunatu putanju, te se ova vrsta kretanja koristi najčešće za prilazna/odlazna gibanja; linearne interpolacije - robotska se ruka kreće slobodno kroz prostor između dvije točke po točno definiranoj ravnoj putanji, te se ova vrsta kretanja koristi za linije zavarivanja; kružne interpolacije - robotska se ruka giba polukružno ili kružno gdje je nužno definirati 3 pomoćne točke pomoću kojih se određuje kružna putanja kojom će se robotska ruka gibati, ova se vrsta kretanja koristi za linije zavarivanja
- 8 Definiranje koordinatnog sustava robotskog sustava
- 9 Brzina gibanja pištolja za zavarivanje prilikom programiranja – poželjno je da je prilikom približavanja radnom komadu nešto manja kako ne bi došlo do sudara vrha pištolja za zavarivanje s radnim komadom i mogućeg oštećivanja
- 10 Naredba za uspostavljanje električnog luka
- 11 Naredba za slanje željenog programa u upravljačku jedinicu robota
- 12 Naredba za propuhivanje zaštitnog plina kroz sustav za dovod plina, od boce sa zaštitnim plinom pa sve do izlaza sapnice pištolja za zavarivanje – koristi se nakon promjene zaštitnog plina, kada je potrebno ispuhati sav preostali stari plin, kako ne bi došlo do onečišćenja zavara starim plinom

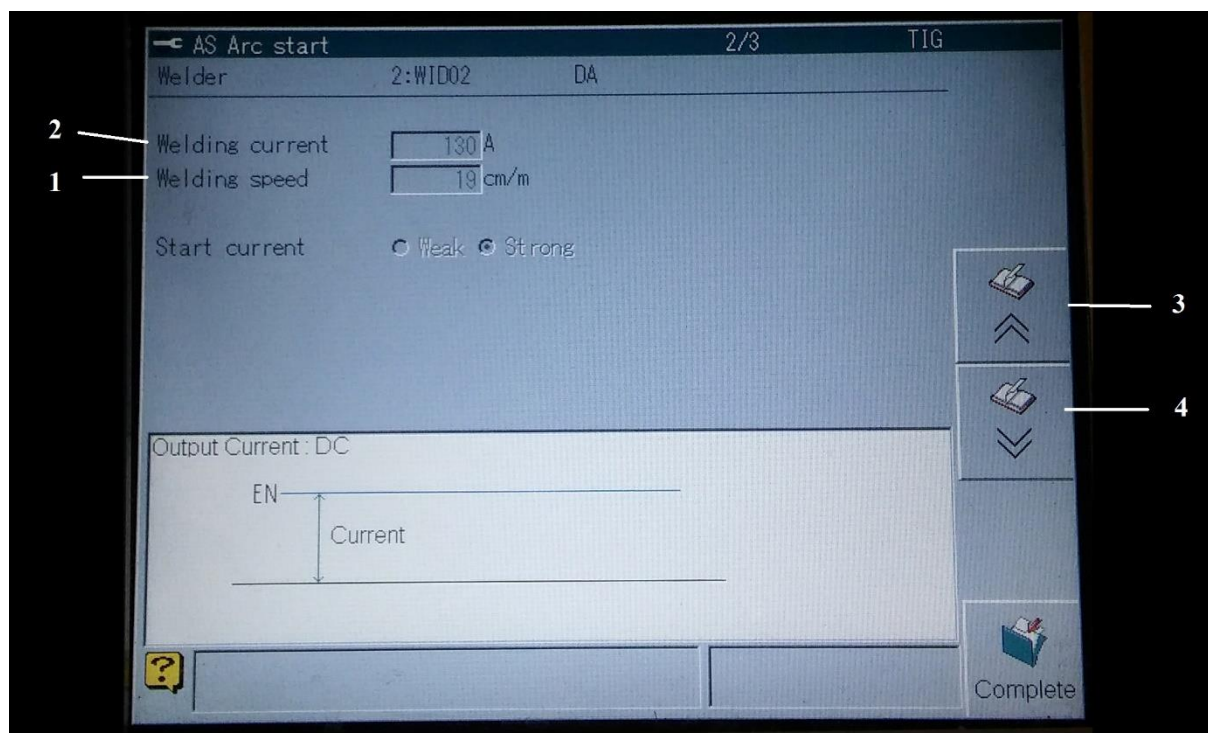


Slika 36. Određivanje parametara zavarivanja (stranica 1)



Na Slici 36. označeni parametri su sljedeći:

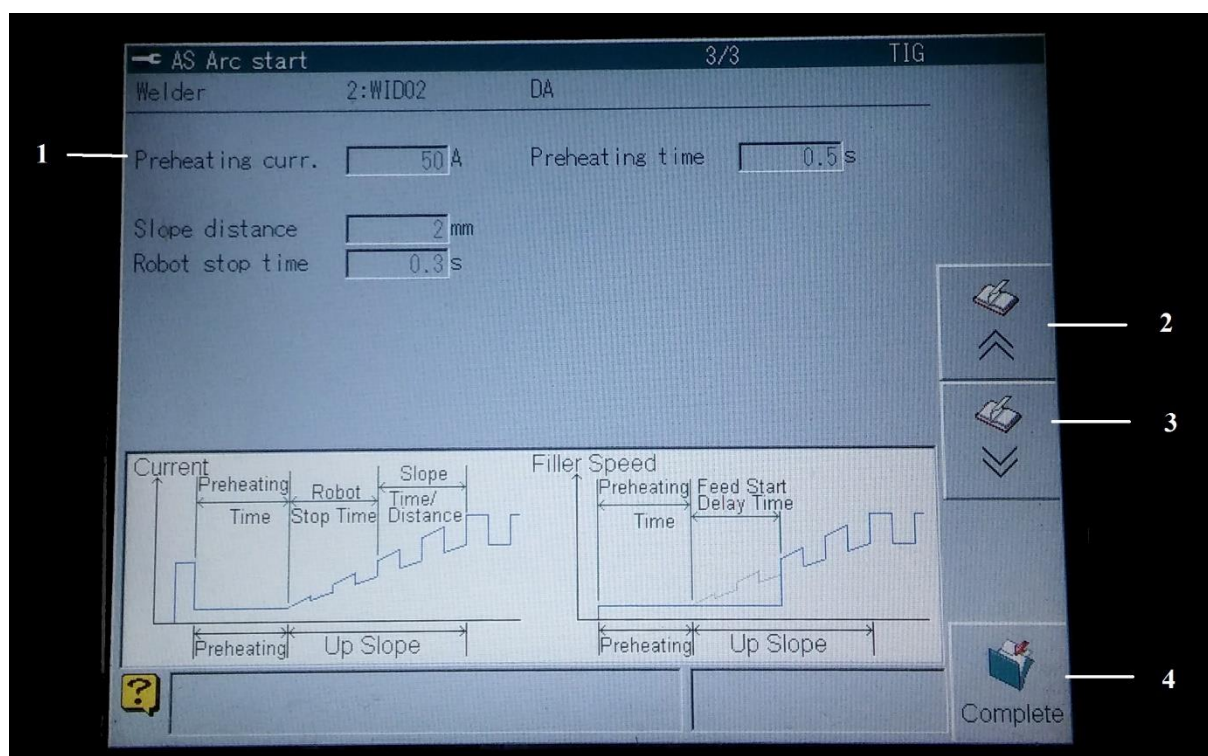
- 1 Odabir vrste struje zavarivanja – istosmjerna, izmjenična, istosmjerna impulsna, izmjenična impulsna
- 2 izbor postojeće ili kreiranje nove datoteke s parametrima za zavarivanje (nova datoteka se kreira tako da se upiše broj koji nije zauzet od strane već postojeće datoteke)
- 3 Tipka za povratak na prethodnu stranicu
- 4 Tipka za odlazak na sljedeću stranicu



Slika 37. Određivanje parametara zavarivanja (stranica 2)

Na Slici 38. označeni parametri su sljedeći:

- 1 Odabir brzine zavarivanja u [cm/min]
- 2 Odabir jakosti struje zavarivanja u [A]
- 3 Tipka za povratak na prethodnu stranicu
- 4 Tipka za odlazak na sljedeću stranicu



Slika 38. Određivanje parametara zavarivanja (stranica 3)

Na Slici 38. označeni parametri su sljedeći:

- 1 Odabir jakosti struje predgrijavanja u [A]
- 2 Tipka za povratak na prethodnu stranicu
- 3 Tipka za odlazak na sljedeću stranicu
- 4 Tipka za potvrđivanje i spremanje unešenih promjena

Na Slici 39. nalazi se privjesak za učenje i na njemu su označeni:

- 1 Prekidač za ručni/automatski način rada
- 2 Tipka za zaustavljanje robota (sigurnosni prekidač)
- 3 Funkcijske tipke
- 4 Tipke za upravljanje gibanja robotskog manipulatora
- 5 „Dead man switch“ – sigurnosni prekidač sa stražnje strane privjeska za učenje (robotski manipulator se kreće u ručnom načinu rada samo dok je prekidač pritisnut)
- 6 LCD ekran



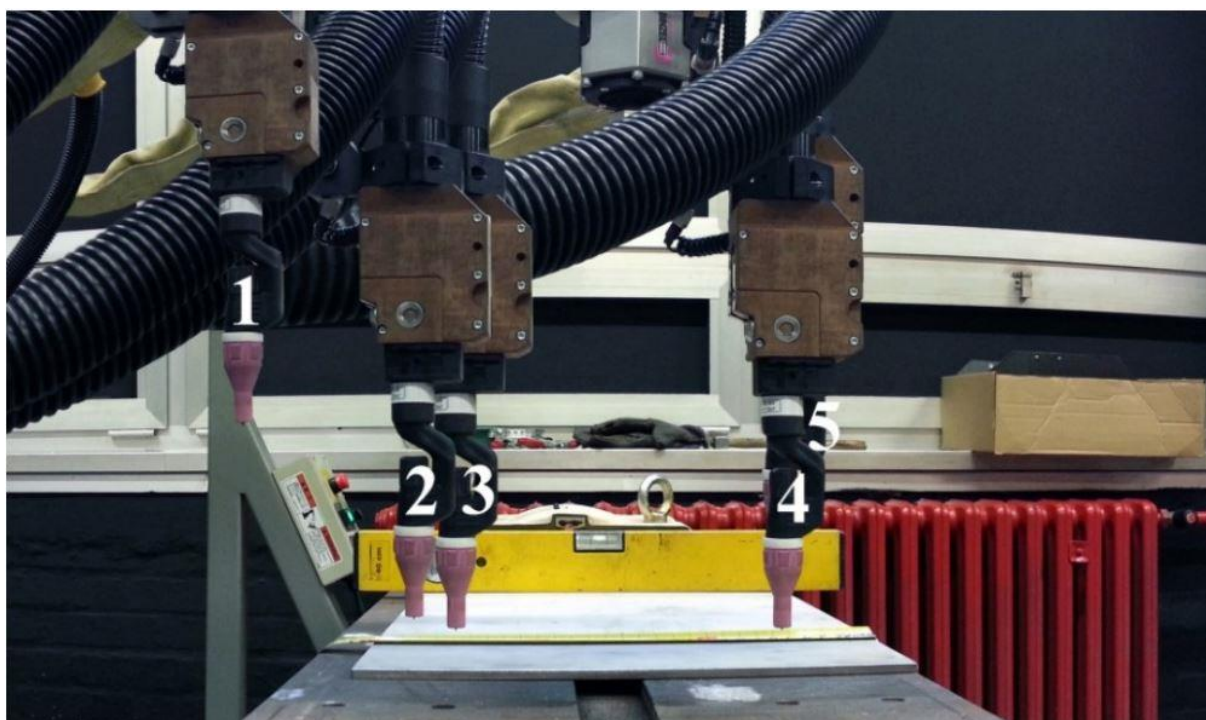
Slika 39. Privjesak za učenje



## 4.5. Navarivanje

Prilikom navarivanja korištena je volframova elektroda WL 15 (zlatna) legirana s lantanovim oksidima, promjera 2,4 mm, sapnica pištolja za zavarivanje je unutarnjeg promjera 7,5 mm, udaljenost vrha volframove elektrode od površine radnog komada iznosi 4.3 mm, a volumni protok oba zaštitna plina (He3H1 i 100% Ar) je jednak, te on iznosi 8 l/min.

Zbog relativno niskih koeficijenata toplinske vodljivosti i visokih koeficijenata toplinske istezljivosti austenitni čelici podložni su deformacijama prilikom zavarivanja. Stoga ih je prije samog postupka zavarivanja potrebno dobro pričvrstiti stegama na radnu površinu (na pozicioner). Fiksiranjem radnog komada umanjuje se mogućnost pogreške uzrokovane neravnomjernim razmakom između elektrode i radnog komada. Slika 40. prikazuje točke putanje vrha elektrode. Točka 1,2,3 - primicanje vrha elektrode radnom komadu; od točke 3 do 4 vrši se proces navarivanja; točka 4,5 - odmicanje od radnog komada.



Slika 40. Putanje vrha volframove elektrode [5]

Navarivanje na svakoj ploči izvedeno je u horizontalnom položaju. Nakon izvođenja svakog prolaza navara, ploča se hladila na zraku i prije novog prolaza navarivanja provjeravala se temperatura dijela ploče na kojeg će se sljedeće navarivati kako bi se uvjerali da je temperatura dovoljno pala, kako bi postupak navarivanja bio proveden u istim uvjetima za sve prolaze. Za to mjerenje temperature korišten je infracrveni Fluke 566 IR termometar, koji je prikazan na Slici 42. Kada se ploča dovoljno ohladila (oko 35 °C), svaki navar na ploči je bio označen markerom, a nakon toga slijedilo je navarivanje novog prolaza.



Slika 41. Fluke 566 IR termometar

Jedna od informacija koja je bitna u analizi nakon zavarivanja bit će i iznos unesene topline u zavar. Unos topline računa se prema sljedećoj formuli:

$$Q = \frac{k \cdot U \cdot I \cdot 60}{V_z \cdot 1000} \quad [1]$$

Gdje je:

$Q$  – Unesena toplotina [kJ/mm]

$U$  – Napon zavarivanja [V]

$I$  – Jakost struje zavarivanja [A]

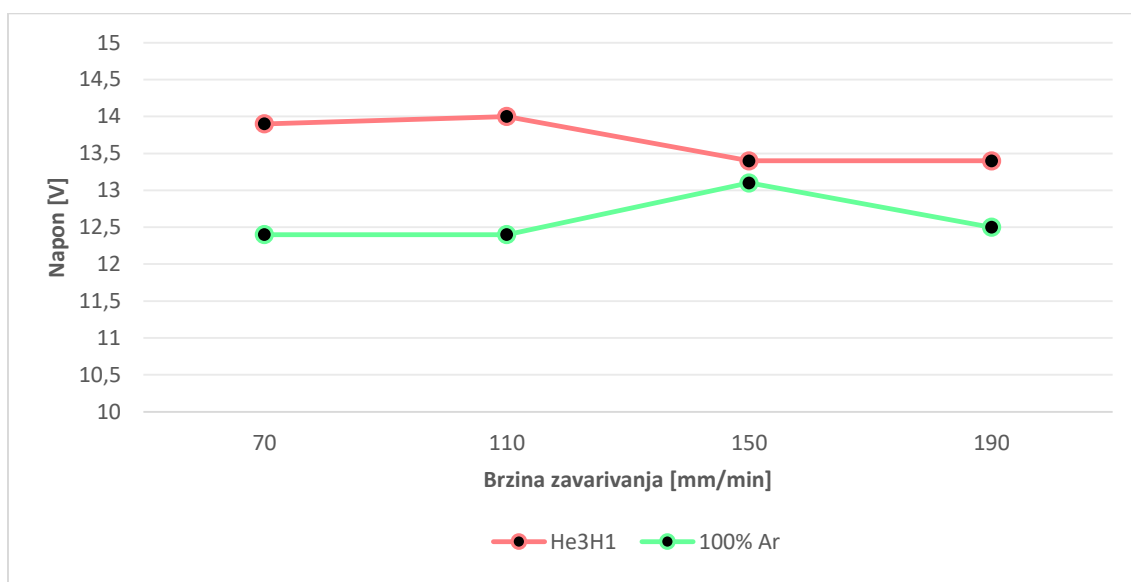
$V_z$  – Brzina zavarivanja [mm/min]

$k$  – Koeficijent toplinske iskoristivosti postupka zavarivanja, za TIG postupak,  $k = 0,6$

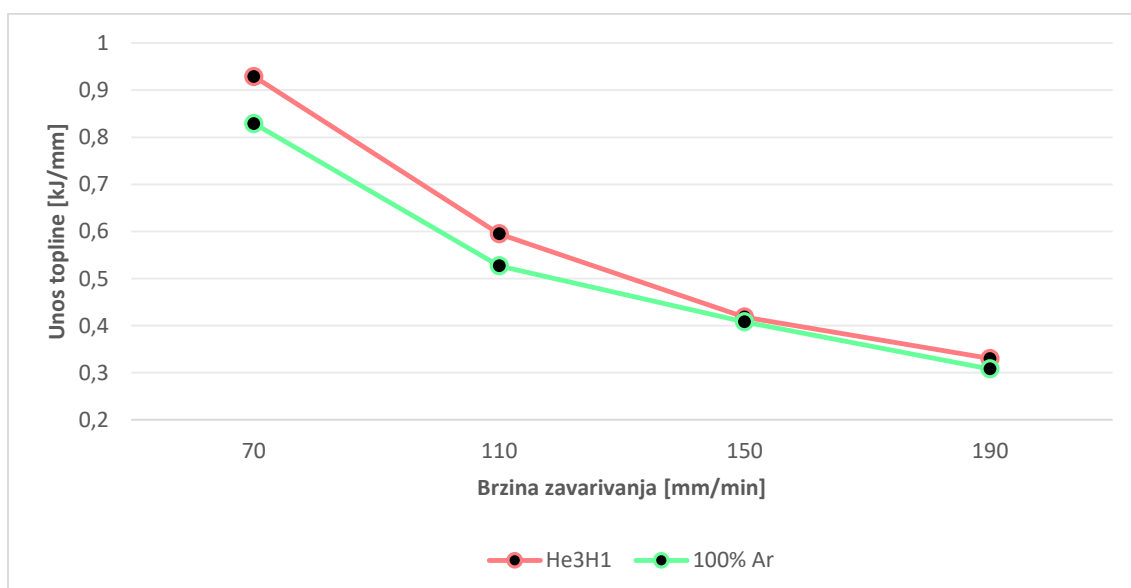
U Tablici 6. dane su oznake uzoraka i parametri korišteni prilikom zavarivanja. Na Slici 42. dan je grafički prikaz utjecaja brzine zavarivanja na napon, a na Slici 43. dan je grafički prikaz utjecaja brzine zavarivanja na unos topline.

Tablica 6. Parametri robotiziranog TIG zavarivanja

Uzorak	Vrsta i polaritet struje	Zaštitni plin	Jakost struje	Napon	Protok zaštitnog plina	Brzina zavarivanja	Unos topline
			[A]	[V]	[l/min]	[mm/min]	[kJ/mm]
1	DC -	He3H1	130	13,9	8	70	0,929
2	DC -	He3H1	130	14,0	8	110	0,595
3	DC -	He3H1	130	13,4	8	150	0,418
4	DC -	He3H1	130	13,4	8	190	0,330
1A	DC -	100% Ar	130	12,4	8	70	0,829
2A	DC -	100% Ar	130	12,4	8	110	0,527
3A	DC -	100% Ar	130	13,1	8	150	0,408
4A	DC -	100% Ar	130	12,5	8	190	0,308



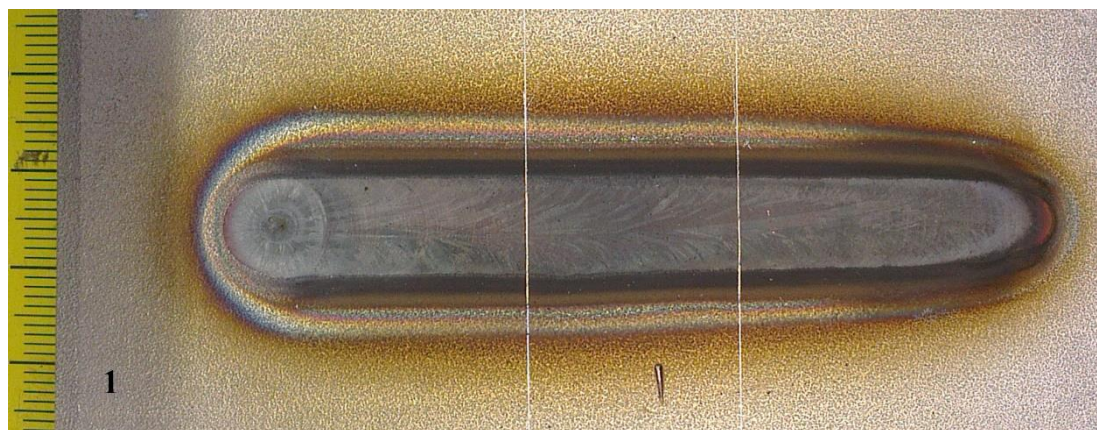
Slika 42. Grafički prikaz utjecaja napona o brzini zavarivanja



Slika 43. Grafički prikaz utjecaja unosa topline o brzini zavarivanja

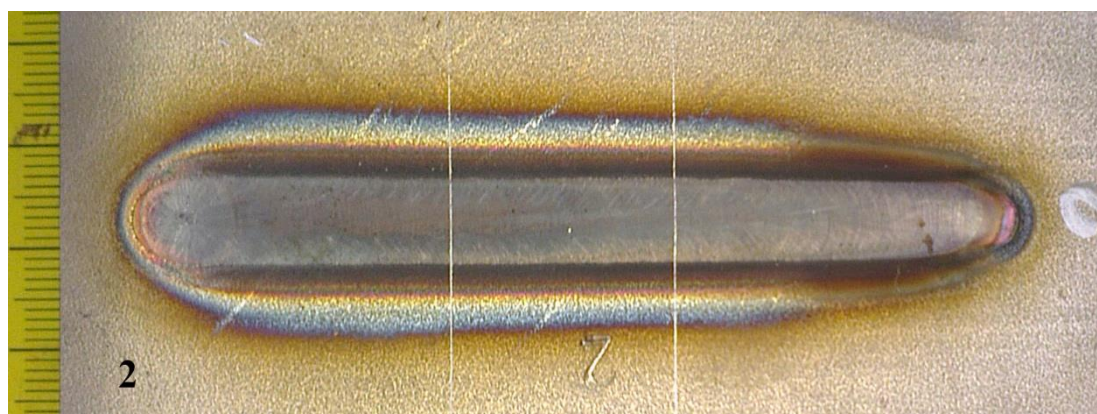


U nastavku su prikazane slike zavora.



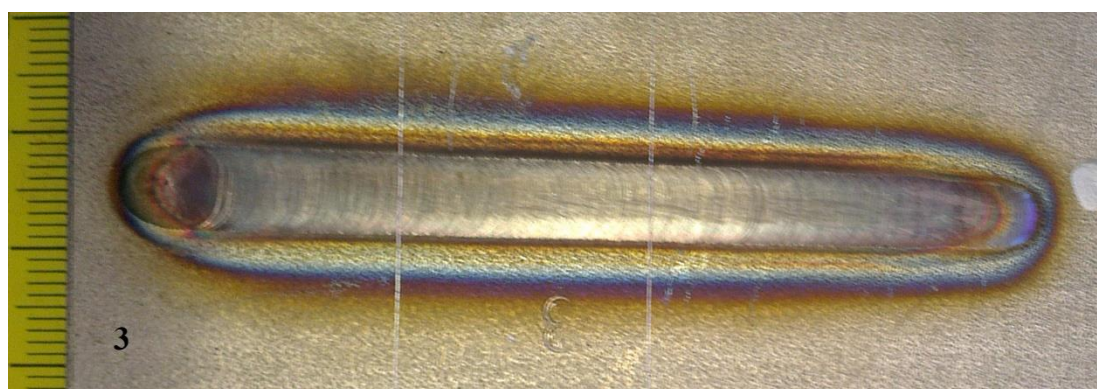
Slika 44.

Uzorak 1



Slika 45.

Uzorak 2



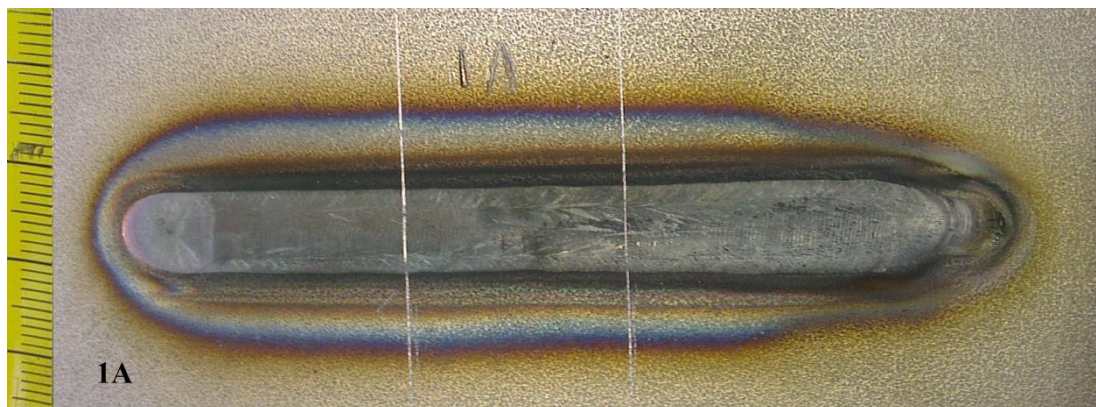
Slika 46.

Uzorak 3

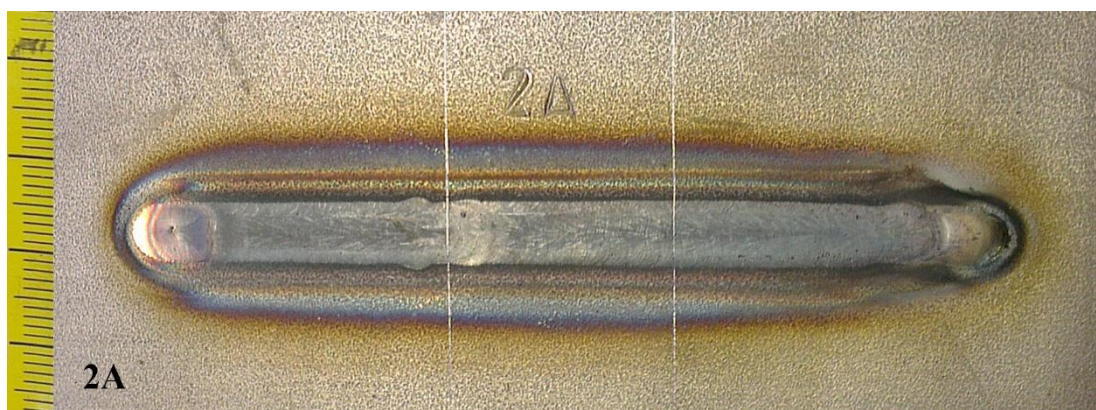




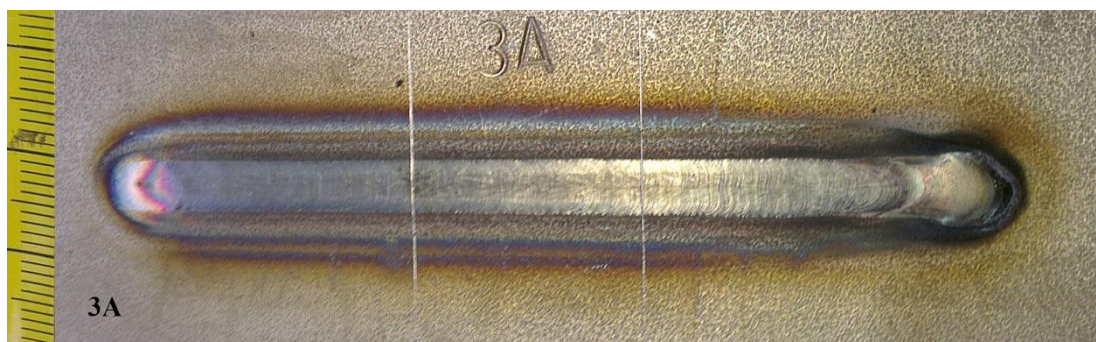
Slika 47. Uzorak 4



Slika 48. Uzorak 1A

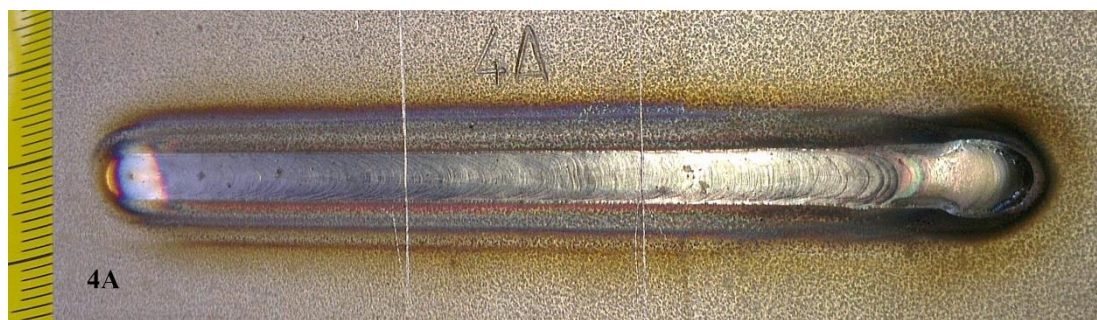


Slika 49. Uzorak 2A

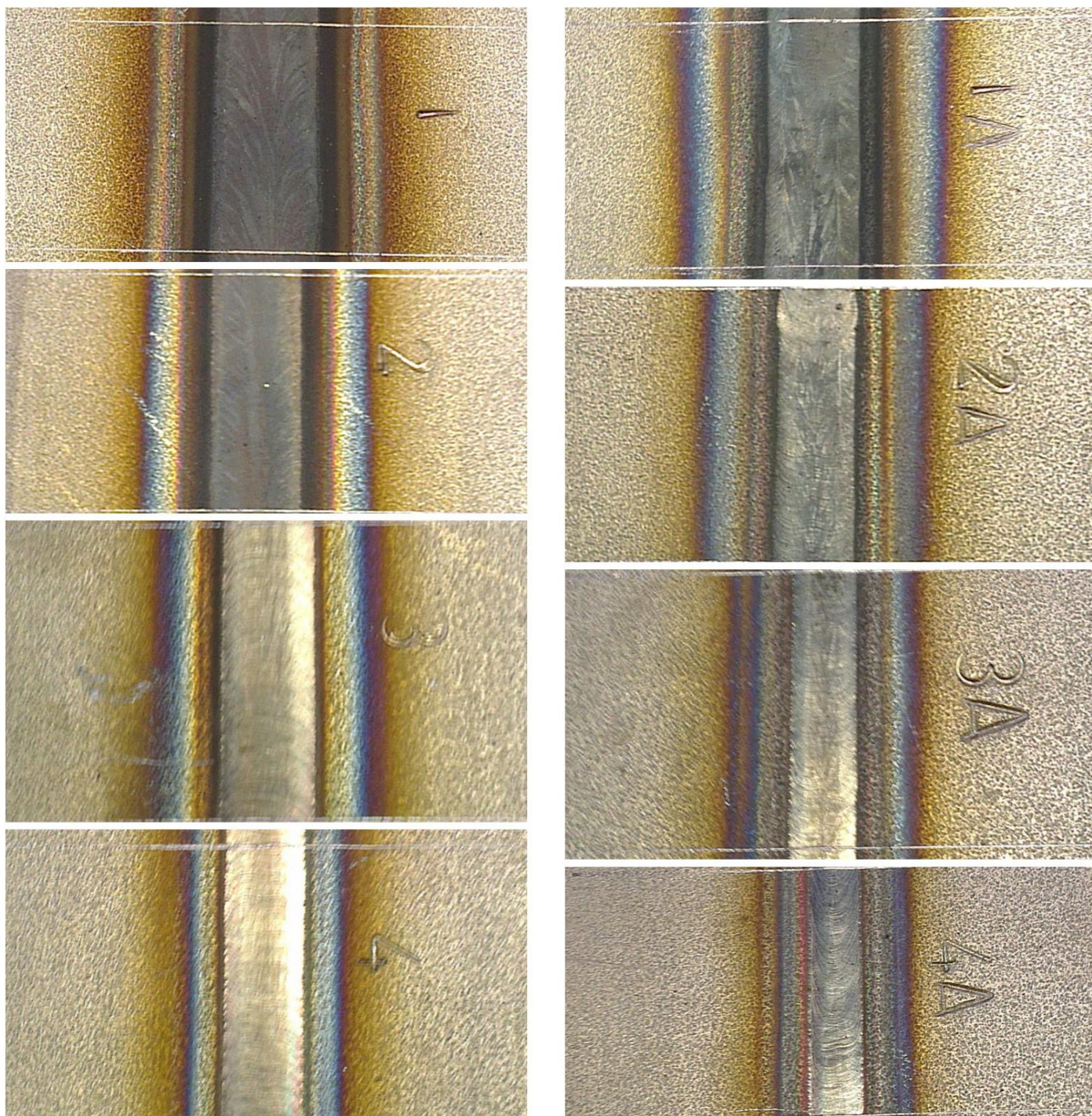


Slika 50. Uzorak 3A



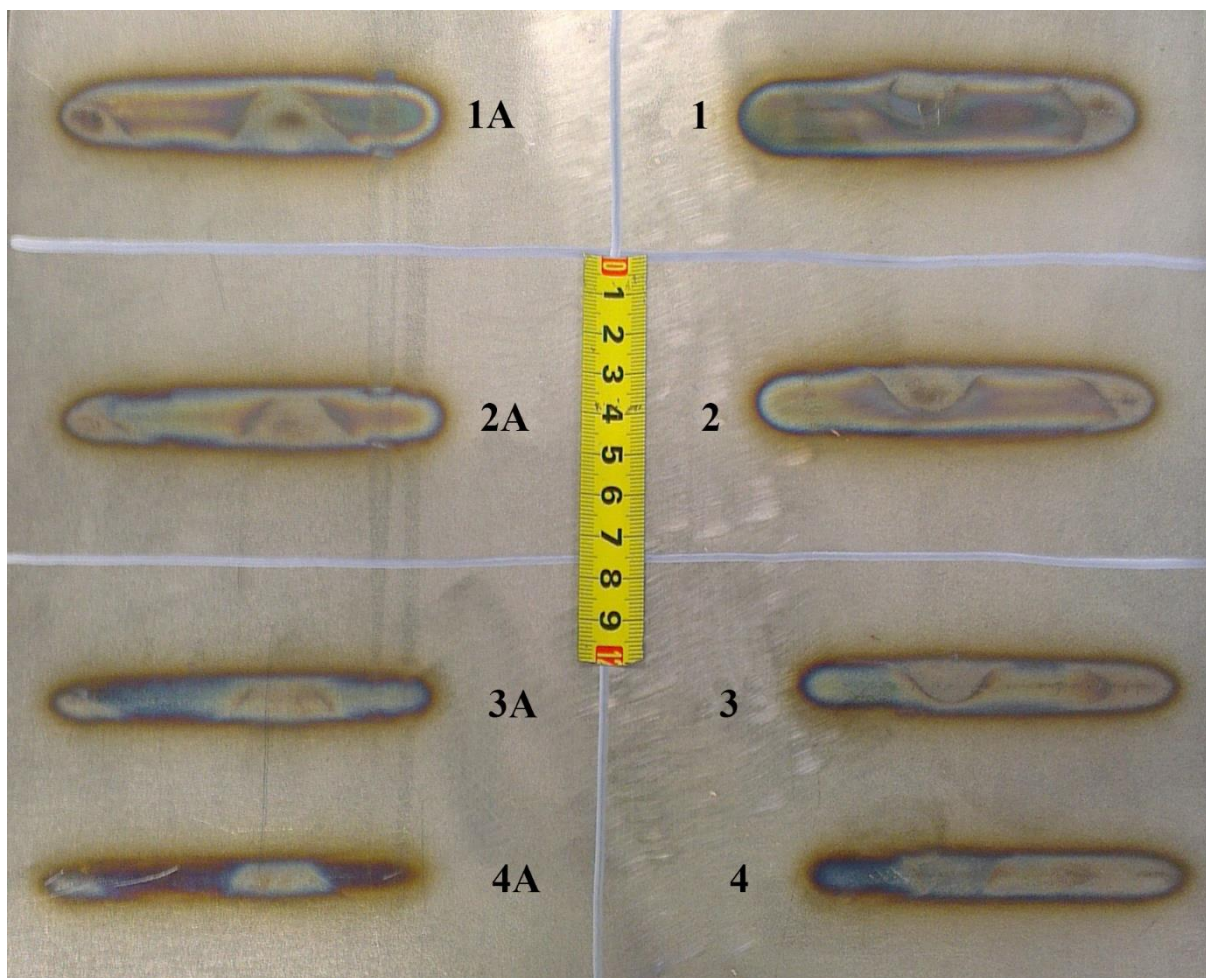


Slika 51. Uzorak 4A



Slika 52. Izgled prednje površine svih zavara





Slika 53. Izgled stražnje površine svih zavara

U Tablici 7. dane su boje oksidnog sloja na površini AISI 304 čelika u ovisnosti o temperaturi pri kojoj su nastale.

Tablica 7. Boje oksidnog sloja prema temperaturi nastajanja [20]

Boja oksidnog sloja	Prosječna temperatura stvaranja [°C]
blijedo žuta (engl. pale yellow)	290
boja slame (engl. straw yellow)	340
tamno žuta (engl. dark yellow)	370
smeđa (engl. brown)	390
ljubičasto smeđa (engl. purple brown)	420
tamno ljubičasta (engl. dark purple)	450
plava (engl. blue)	540
tamno plava (engl. dark blue)	600

Sa Slike 44. i 52. vidljivo je da uzorak 1 ima najširi navar i najširu zonu utjecaja topline (ZUT). Također je vidljivo relativno veliko i široko obojenje tamno žuto/zlatne boje oko središnjeg dijela navara uz tamno sivo obojenje na rubu samog navara i ono je ravnomjerno po cijeloj duljini. Početni dio navara je prilično zacrnjen, a na kraju navara je vidljiv krater oko kojega se nalazi svijetlo sivo obojenje koje postepeno preko plavog i ljubičastog prelazi u tamno žutu/zlatnu boju. Na Slici 44. vidljivo je da tijekom zavarivanja imali „guranje“ rastaljenog materijala od strane električnog luka. Ova je pojava direktno povezana s unosom topline, koje je kod uzorka 1 bilo najveće. Stoga su u navaru vidljive linije u smjeru kretanja pištolja za zavarivanje i one upućuju na duže vrijeme hlađenje navara zbog veće količine rastaljenog metala. Sa Slike 53. vidljivo je i obojenje stražnje površine zbog velikog unosa topline pretežito plave, ljubičaste i tamno žute/zlatne boje.

Uzorak 2 prikazan na Slici 45. ima uži navar, ZUT i obojenje od uzorka 1. Na početnom dijelu navara zacrnjenje je puno blaže, na središnjem dijelu uz sam navar javlja se siva boja koja relativno brzo prelazi u zlatnu boju. Krater na kraju navara je manji nego na uzorku 1, a obojenje je svijetlo sive boje i vrlo usko. Također vidljiva je ponovna „guranje“ rastaljenog materijala od strane električnog luka (uzrok je isti – velik unos topline i duže vrijeme potrebno da se rastaljeni metal ohladi), međutim ta pojava nije bila toliko izražena kao na uzorku 1. Na stražnjoj strani javlja se vidljivo obojenje površine kao što je vidljivo na Slici 53. Ono je dosta manje nego kod uzorka 1 i pretežito je ljubičaste i tamno žute/zlatne boje.

Uzorak 3 prikazan na Slici 46. ima uži navar, ZUT i obojenje (koje se blago širi u smjeru zavarivanja) od uzoraka 1 i 2. Na početnom dijelu navara nema zacrnjenja, već se javlja svjetlo ljubičasto obojenje koje prelazi u zlatno. Na kraju navara nema kratera, a na prednjem rubu javlja se tamno plavo obojenje. U sredini navara obojenje je svijetlo smeđe boje te preko sive, plave i ljubičaste prelazi u tamno žutu/zlatnu boju. Također na Slici je vidljiva pojava ujednačenih narebrenja na cijelom navaru. Na stražnjoj strani prikazanoj na Slici 53. vidljivo blago je vrlo blago obojenje površine (uže nego kod uzoraka 1 i 2) i to većinom na kraju navara, te je ono plavkaste boje. Kada je estetski izgled u pitanju uzorak 3 izgleda najbolje od svih uzoraka kod kojih se kao zaštitni plin koristio He3H1.

Uzorak 4 prikazan na Slici 47. ima do sada najuži navar, ZUT i obojenje. Na početnom dijelu navara postoji blago zacrnjenje, u središnjem dijelu navara obojenje je ravnomjerno te prelazi od ljubičaste preko sive, plave i crvenkaste u zlatnu boju. Na kraju navara pojavio se mali krater i na njegovom prednjem dijelu tamno plavo obojenje. Također se na cijelom navaru vide ujednačena narebrenja. Na stražnjoj strani prikazanoj na Slici 53. vidljivo je blago obojenje površine (manje nego kod uzoraka 1, 2 i 3) osim na samom kraju navara gdje je izraženo plavo i ljubičasto obojenje.

Uzorak 1A prikazan na Slici 48. ima navar širine otprilike jednake onoj širini kao uzorak 2, međutim ZUT i obojenje je veće nego kod uzorka 2. Uz sam navar po cijeloj duljini javlja se tamno sivo obojenje. Na samom početku to sivo obojenje je nešto uže i kasnije se proširi. Područje na kojem je došlo do uspostave električnog luka i stvaranja početne taline uže

je od ostatka navara. Na početku navara moguće je vidjeti da površina nije jednolične boje, već su vidljiva pojedina mjesta koja su puno tamnija. Niti na početku niti na kraju navara nisu se pojavili krateri. U središnjem dijelu navara sivo obojenje prelazi preko smeđeg, svjetlo sivog, plavog i ljubičastog u tamno žuto/zlatno. Također vidljivo je da smo na sredini navara imali „guranje“ rastaljenog materijala od strane električnog luka zbog velikog unosa topline kako je već objašnjeno kod uzoraka 1 i 2, međutim ono je bilo manje izraženo na uzorku 1A. Na stražnjoj strani prikazanoj na Slici 53. vidljivo obojenje površine koje svojom veličinom odgovara otprilike po veličini i boji obojenju stražnje površine uzoraka 2. Tijekom postupka zavarivanja došlo je do pojave stvaranja mjehurića u talini na području koje se nalazilo odmah iza električnog luka.

Uzorka 2A prikazan je na Slici 49. Kod njega je širina navara i ZUT manja nego kod uzorka 1A. Obojenje je ravnomjerni po duljini navara i kreće se od sivog uz sam rub navara preko smeđeg, svjetlo plavog i ljubičastog do tamno žutog/zlatnog. Na početnom dijelu nema pojave kratera, ali je došlo do blagog zacrnjenja. Na kraju navara isto nema pojave kratera a obojenje je vrlo usko. Također vidljivo je da je na sredini došlo do poremećaja u izgledu navara, prouzrokovanog uključinom ili nečistoćom koja se nalazila u osnovnom materijalu. Obojenje površine na stražnjoj strani prikazano je na Slici 53. i ono je otprilike jednako onome uzorka 3. Kao i kod uzorka 1A došlo je do stvaranja mjehurića u talini na području koje se nalazilo odmah iza električnog luka, ali ukupna duljina na kojoj je zamijećena ova pojava bila je manja nego kod uzorka 1A.

Uzorak 3A prikazan na Slici 50. ima uzak navar, ZUT i obojenje. Na početku je vidljivo postojanje veće količine početne taline, čija je okolina zacrnjena i kasnije prelazi prema tamno žutoj/zlatnoj boji. Nakon početnog dijela širina navara, ZUT i obojenje je konstantno do kraj navara, a vidljiva su i pravilna narebrenja. Na središnjem dijelu navara obojenje polazi od sivog uz sam navar preko smeđeg, plavog i ljubičastog do tamno žutog/zlatnog. Na stražnjoj strani navara vidljivo je obojenje plavkaste boje, te je ono uže nego na uzorku 2A. Slika 53. prikazuje izgled obojenja stražnje površine uzorka 3A.

Uzorak 4A prikazan na Slici 51 ima najuži navar, ZUT i obojenje. Na početnom dijelu navara vidljivo je postojanje veće količine taline, čija je okolina prilično jako zacrnjena. Nakon tog početnog dijela širina zavora, ZUT i obojenje koje polazi od crvenkastog preko plavkasto ljubičastog do tamno žutog/zlatnog, te je konstantno do kraj zavora. Na cijeloj duljini navara vidljiva su pravilna narebrenja. Na stražnjoj strani prikazanoj na Slici 53. vidljivo je najuže obojenje u odnosu na sve druge uzorke i ono je ljubičaste boje.

Sa Slike 52. vidimo da postoji razlika u obojenju ovisno o zaštitnom plinu koji se koristi. Pri korištenju He3H1 obojenje je šire, a same boje su tamnije nego što je to slučaj kada se koristi 100% Ar. S druge pak strane redoslijed kojim se izmjenjuju boje od samog navara prema van je više manje isti za sve uzorke. Također, kod skoro svih uzoraka, prvo obojenje (ono najbliže navaru) je sive boje što zapravo govori o velikom unosu topline na to mjesto.

Na Slici 53. vidljiva je pojava obojenja polukružnog oblika koja se javljaju jer se na tim mjestima tijekom postupka zavarivanja nalazila rupa na radnome stolu pozicionera koja služi za pritezanje radnih komada. Stoga ti dijelovi nisu bili u kontaktu s radnim stolom kao ostatak osnovnog materijala, pa su se zbog toga i sporije hladili što je rezultiralo različitim obojenjem.

## 4.6. Izrada makroizbrusaka

Nakon provedenog navarivanja potrebno je iz velikih uzoraka izrezati manje na kojima se radi makroizbrusak, te kasnije geometrija navara.

Prvo je cijela ploča izrezana na manje komade korištenjem CNC plazma rezača Vanad. Parametri rezanja bili su sljedeći: brzina rezanja iznosila je 2 m/min, jakost struje 80 A, a tlak zraka bio je 6 bara. Postupak je prikazan na Slici 54.

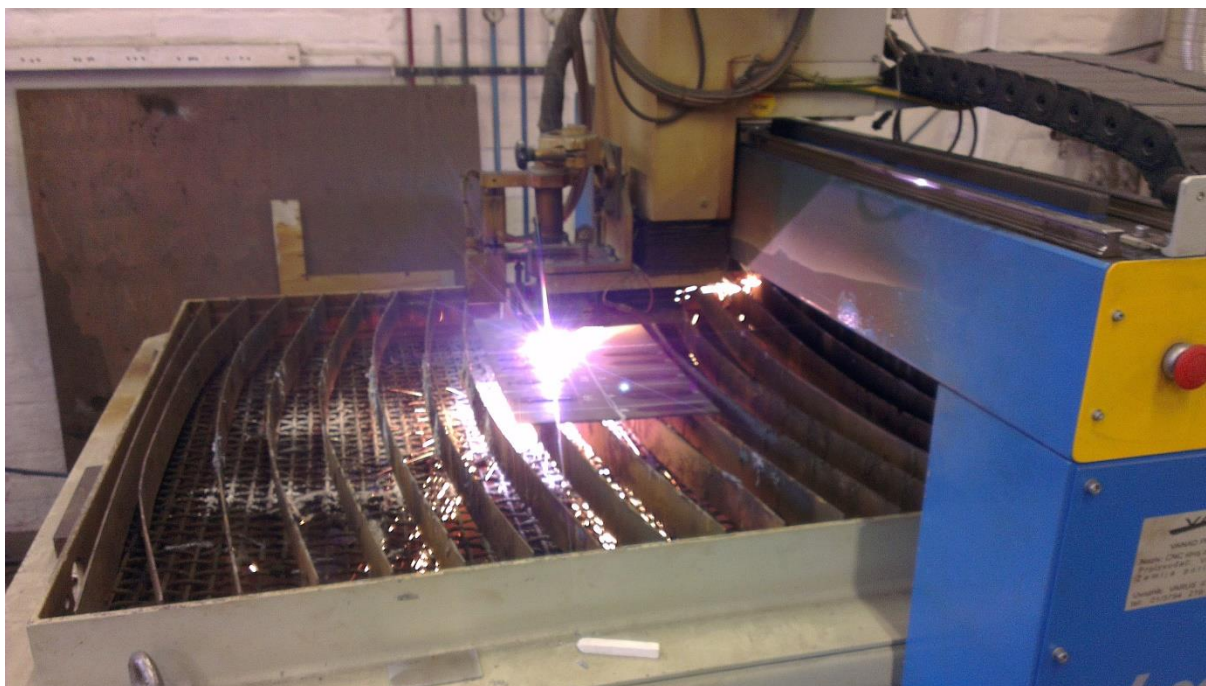
Nakon rezanja na manje komade, slijedilo je izrezivanje uzoraka širine 25 mm. Taj se uzorak nalazio na sredini zavora gdje su se već vi parametri zavarivanja ustalili. Rezanje je provedeno na tračnoj pili IMET GBS 185 ECO, kao što je prikazano na Slici 55.

Sljedeći korak bio je brušenje srha nastalog rezanjem na tračnoj brusilici s grubim brusnim papirom (P150). Nakon toga slijedi proces strojnog poliranja koje je bilo provedeno na uređaju za poliranje Buehler Phoenix Alpha prikazanog na Slici 56. Pri poliranju korištene su sve manje granulacije brusne ploče (P320, P500, P1000, P2000 I P4000), brzina rotacije iznosila je 300 [o/min], a tijekom cijelog procesa za hlađenje i odnošenje odvojene čestice koristila se voda.

Ispolirani uzorci zatim se elektrokemijski nagrizzaju u 10% oksalnoj kiselini ( $C_2H_2O_4 \cdot 2H_2O$ ) u dva koraka. U prvom koraku korištena je struja napona 8 V i 2 A u trajanju od 180 s. U drugom koraku korištena je struja napona 12 V i 2,2 A u trajanju od 60 s. Nakon što je završen postupak nagrizzanja uzorci su se ispirali u toploj vodi kako se zaustavila reakcija.

Nagrizzeni uzorci snimljeni su na modularnom stereomikroskopu Leica MZ6 uz korištenje software-a Leica Application Suite kao što je vidljivo na Slici 57.





Slika 54. Rezanje čelične ploče na manje komade na CNC plazma rezaču Vanad



Slika 55. Izrezivanje makroizbrusaka na tračnoj pili IMET GBS 185 ECO



Slika 56. Poliranje uzoraka na uređaju za poliranje Buehler Phoenix Alpha

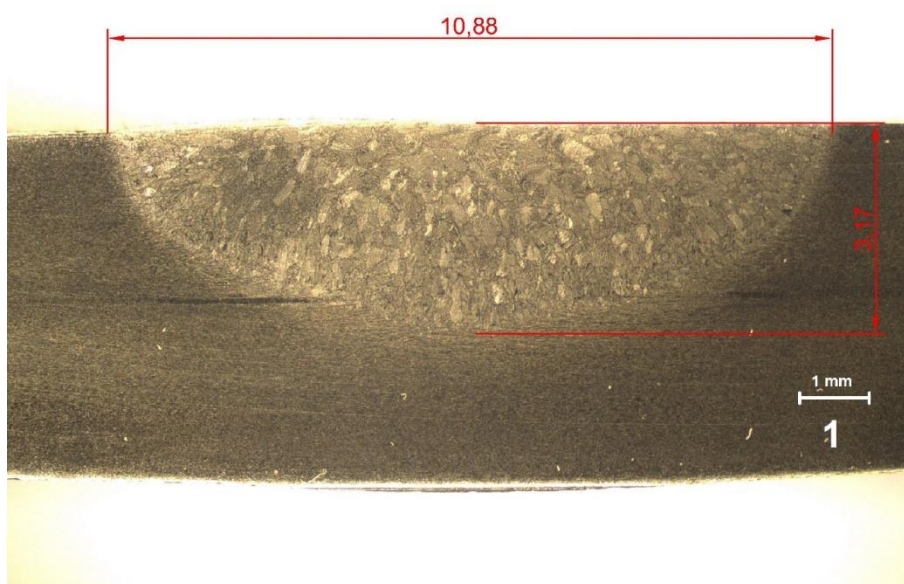


Slika 57. Snimanje makroizbrusaka korištenjem Leica MZ6 stereomikroskopa

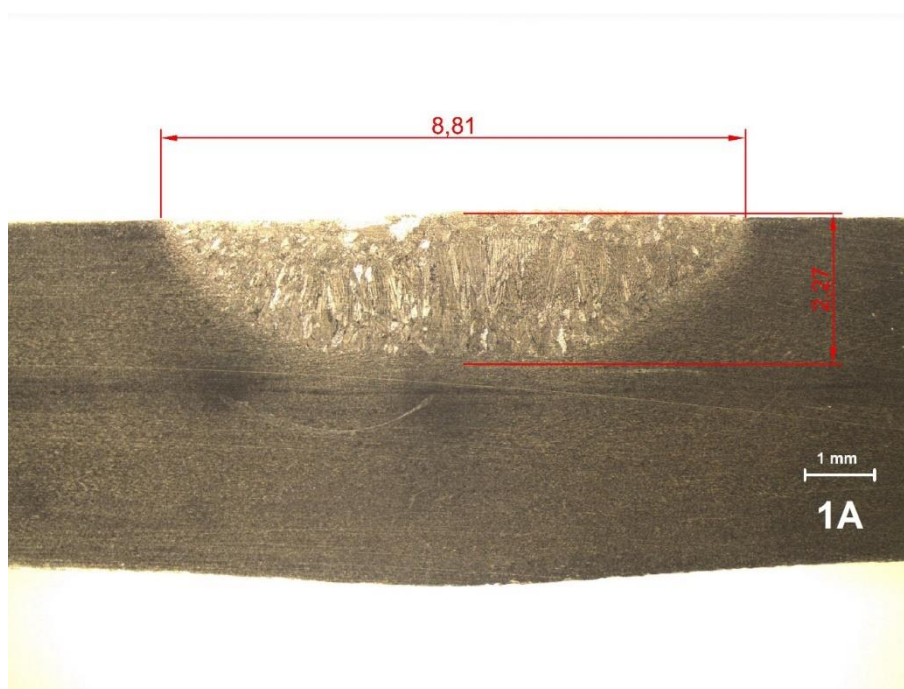


## 4.7. Analiza makroizbrusaka

Nakon nagrivanja uzoraka do izražaja su došla područja zahvaćena utjecajem električnog luka i zona utjecaja topline, te su postale su uočljive. Razlike u nijansama pojedinih područja na površini makroizbrusaka najčešće je uzrokovana mjestimično jačim ili slabijim nagrivanjem kiseline. Glavna uloga analize makroizbrusaka je da ukaže i jasno predoči promjene u širini i penetraciji kod različitih parametara zavarivanja (u ovom slučaju različitih zaštitnih plinova i brzine zavarivanja). U nastavku su dane slike makroizbrusaka.

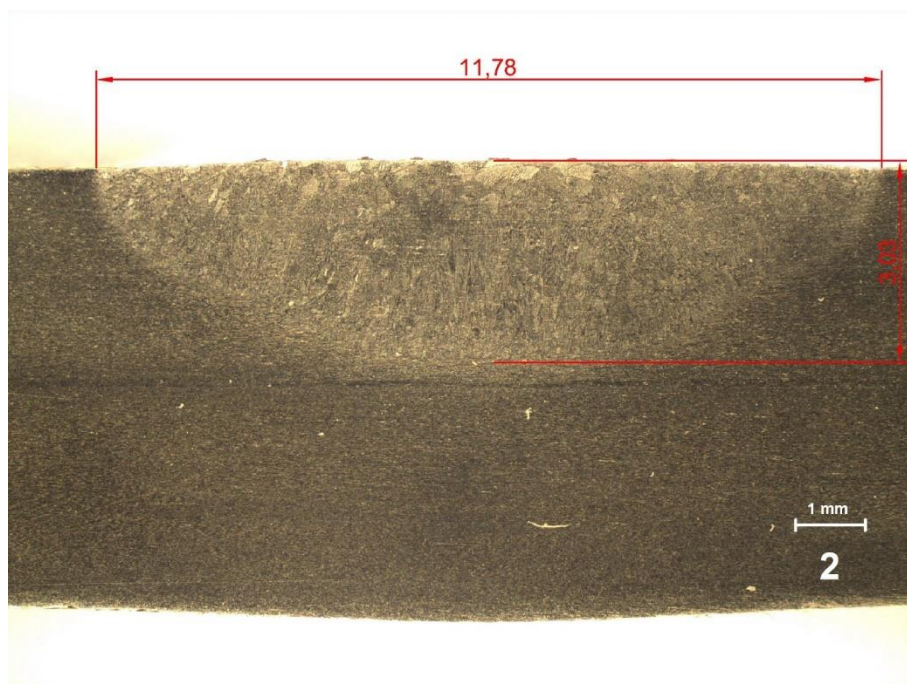


Slika 58. Makroizbrusak 1

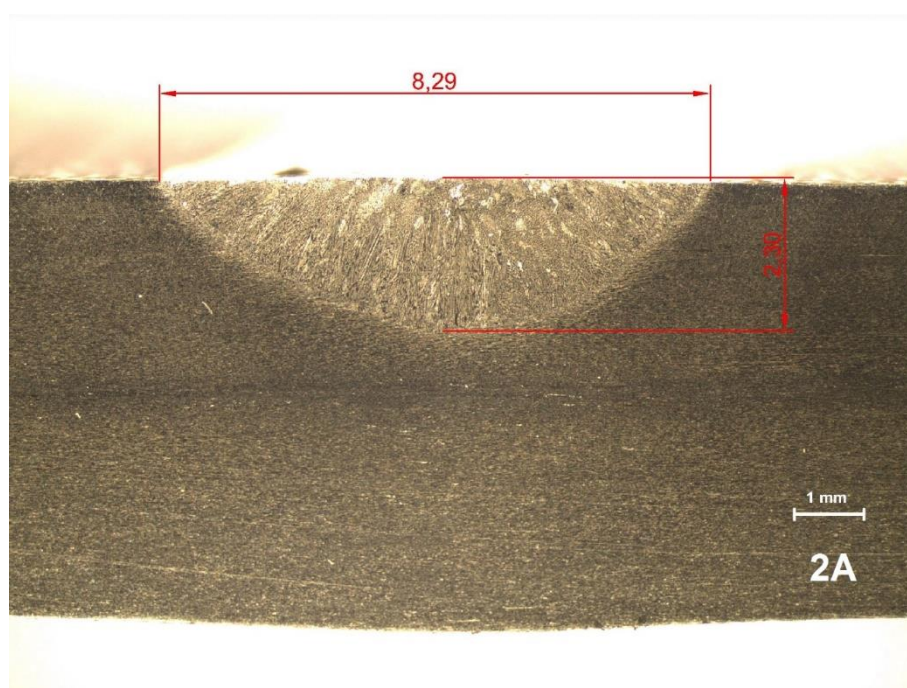


Slika 59. Makroizbrusak 1A

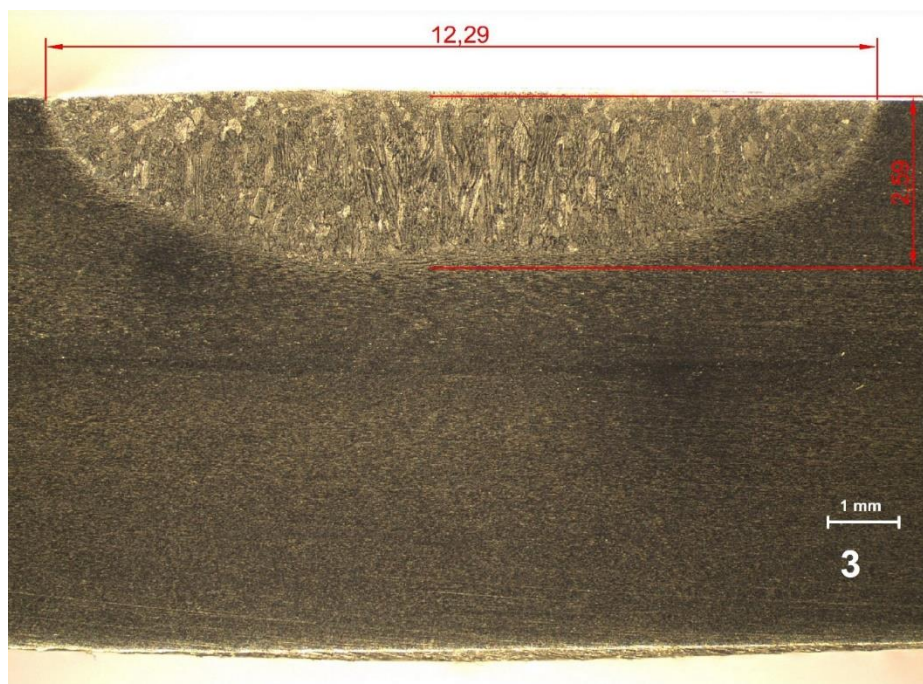




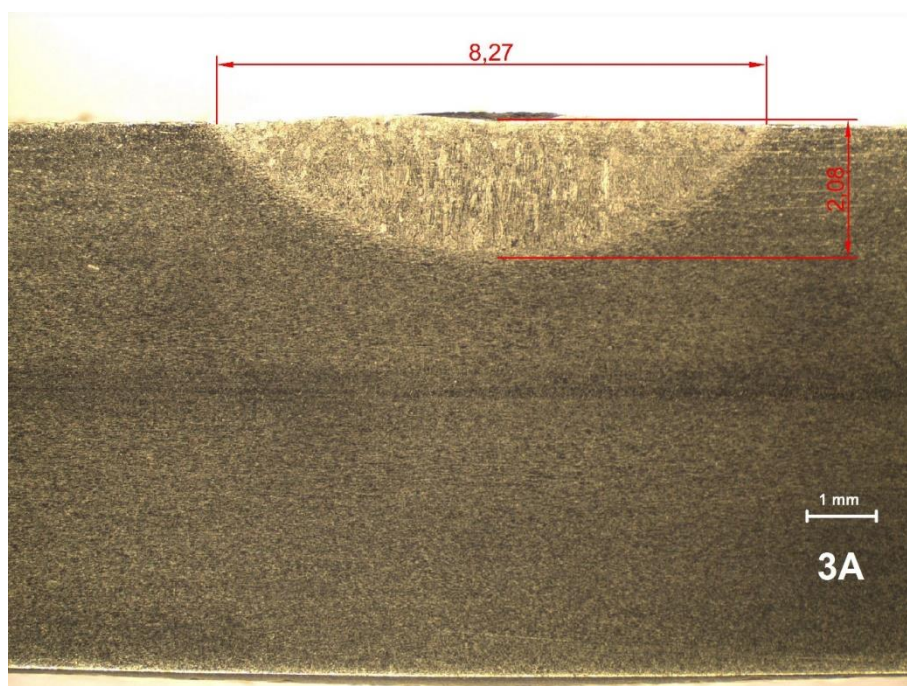
Slika 60. Makroizbrusak 2



Slika 61. Makroizbrusak 2A

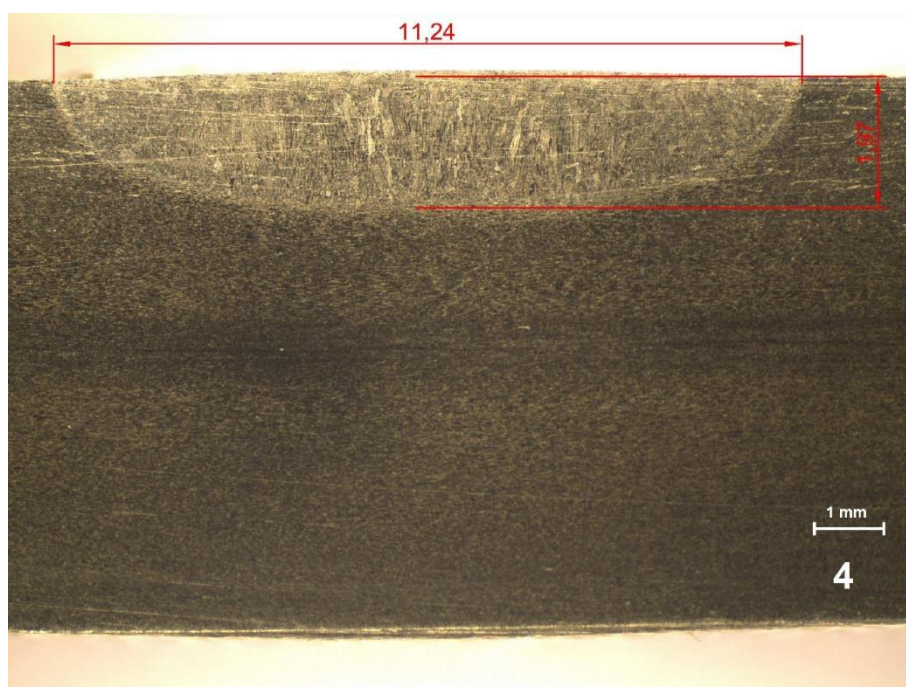


Slika 62. Makroizbrusak 3

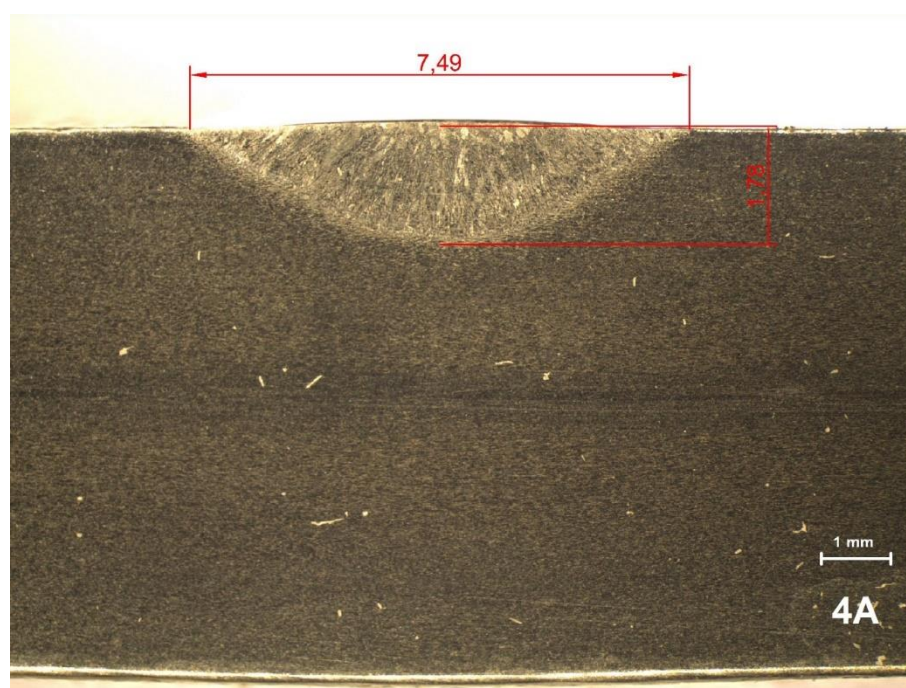


Slika 63. Makroizbrusak 3A



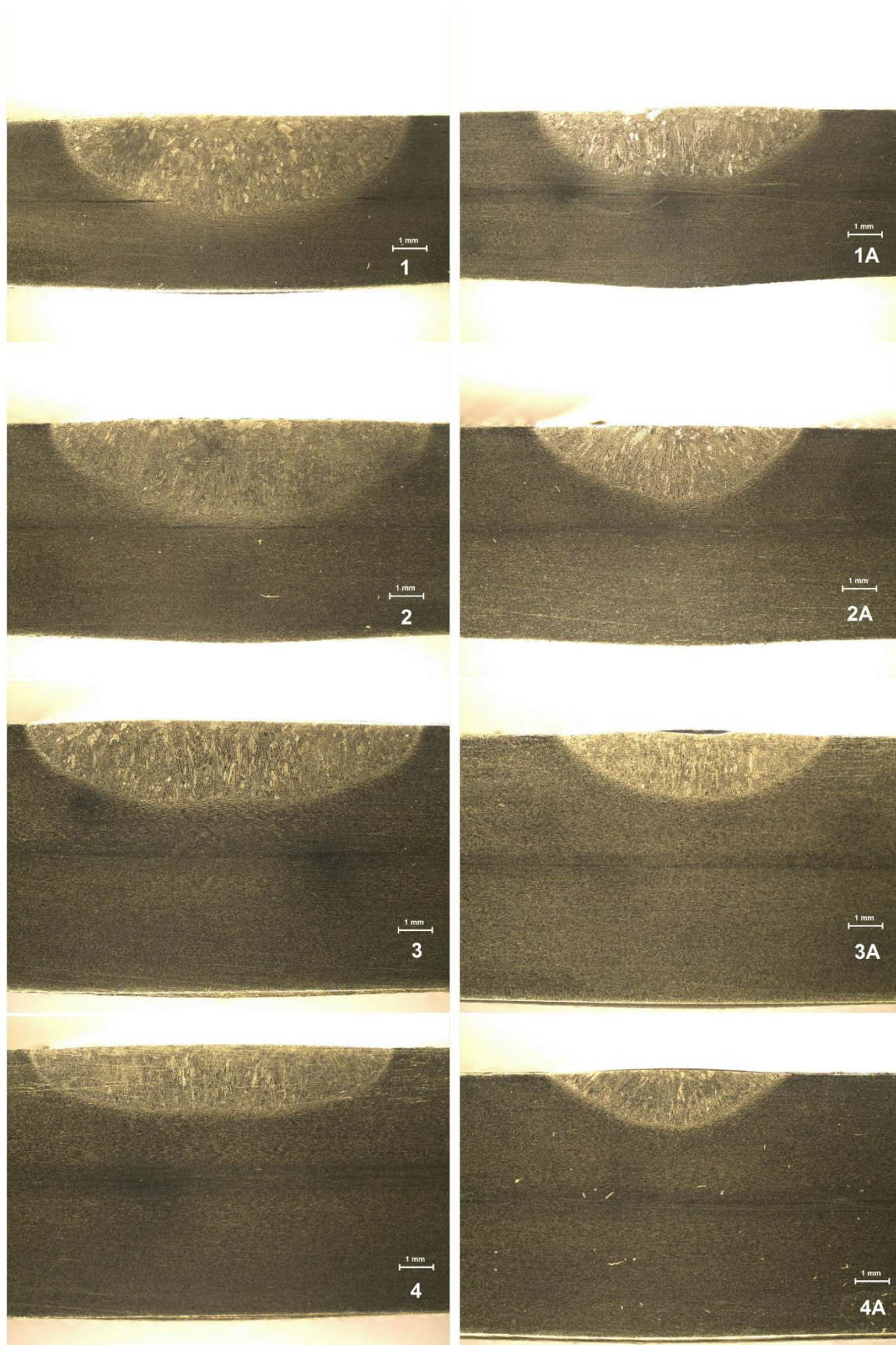


Slika 64. Makroizbrusak 4



Slika 65. Makroizbrusak 4A

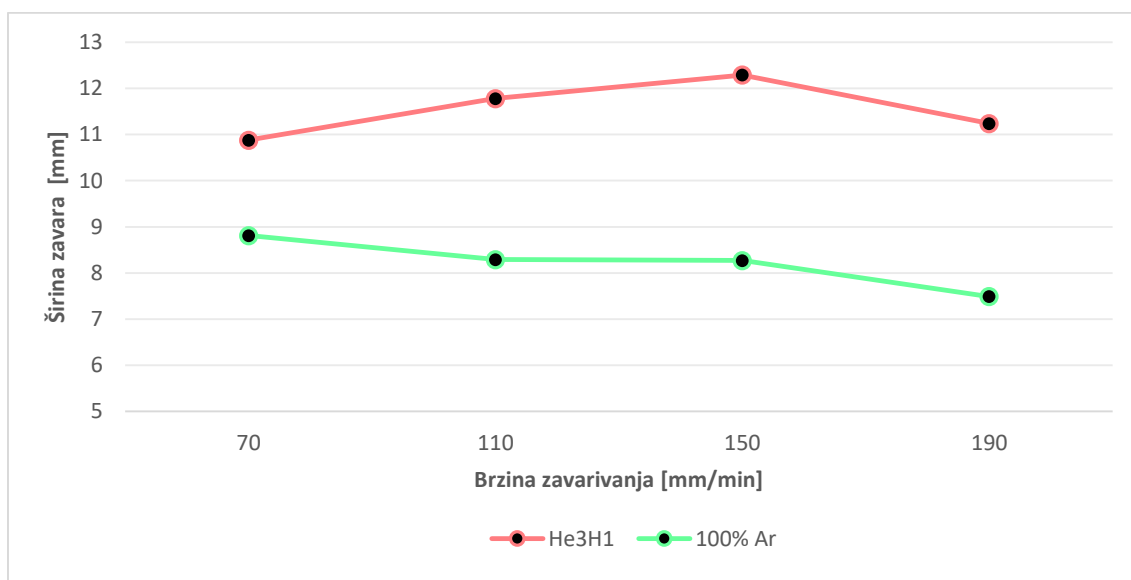




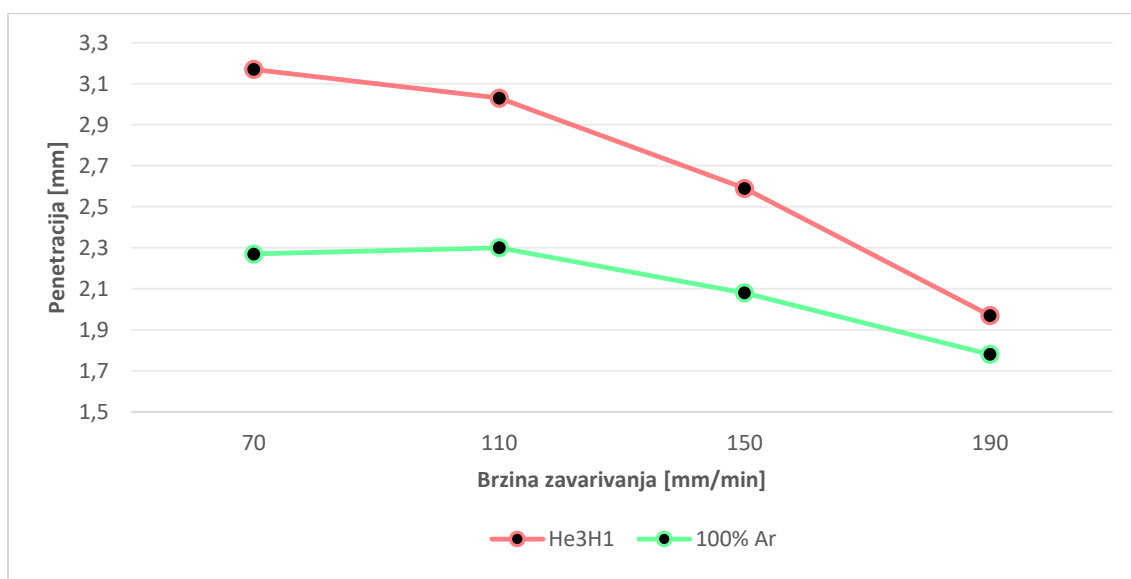
Slika 66. Usporedba svih makroizbrusaka

Tablica 8. Penetracija i širina zavora

Uzorak	Zaštitni plin	Brzina zavarivanja	Unos topline	Širina zavora	Penetracija
		[mm/min]	[kJ/mm]	[mm]	[mm]
1	He3H1	70	0,929	10,88	3,17
2	He3H1	110	0,595	11,78	3,03
3	He3H1	150	0,418	12,29	2,59
4	He3H1	190	0,330	11,24	1,97
1A	100% Ar	70	0,829	8,81	2,27
2A	100% Ar	110	0,527	8,29	2,30
3A	100% Ar	150	0,408	8,27	2,08
4A	100% Ar	190	0,308	7,49	1,78



Slika 67. Utjecaj zaštitnog plina na širinu navara pri različitim brzinama navarivanja



Slika 68. Grafički prikaz utjecaja penetracije o brzini zavarivanja

Na temelju analize prethodnih slika makroizbrusaka može se zaključiti sljedeće:

- Korištenjem He3H1 dobiva se veći unos topline, čime se postiže veća penetracija i širina navara nego je to slučaj kad se kao zaštitni plin primjenjuje 100% Ar. Razlog tome je što He3H1 ima veću toplinsku vodljivost od 100% Ar. To zapravo znači da se toplina iz središta električnog luka može brže prenijeti do površine radnog komada. Stoga pri istim brzinama zavarivanja i jakosti struje He3H1 daje veću penetraciju i veću količinu unesene topline od 100% Ar, kako je i vidljivo iz Tablice 8. Također, primjenom He3H1 toplinska energija je ravnomjernije raspoređena po presjeku električnog luka pa se stoga dobiva i ujednačeniji profil zavara. S druge strane, primjenom 100% Ar električni luk će biti koncentriraniji pa se stoga dobiva i drukčiji izgled navara (veća penetracija u sredini nego na rubovima navara). Međutim, He3H1 ima veći ionizacijski potencijal od 100% Ar, pa je stoga kod njega malo teže ostvariti ispostavu električnog luka.
- Neovisno o tome koji zaštitni plin koristimo penetracija pada povećanjem brzine zavarivanja, a razlog tome je smanjenje unosa topline.
- Kod primjene He3H1 s povećanjem brzine zavarivanja raste i širina navara, ali samo do brzine zavarivanja od 150 mm/min. Kada su brzine zavarivanja veće širina navara se smanjuje. Kada je u pitanju penetracija, ona uvijek pada s povećanjem brzine zavarivanja.
- Kod primijene 100% Ar sa svakim povećanjem brzine zavarivanja penetracija se smanjuje, dok širina zavara na početku pada brže, pa se taj pad uspori, da bi nakon prelaska brzine zavarivanja od 150 mm/min taj pad ponovno postao veći.
- Najveća površina zavara dobiva se kod uzorka 2., primjenom He3H1, i brzine zavarivanja od 110 mm/min.

## 5. Zaključak

Cilj ovog eksperimentalnog rada bio je utvrditi utjecaj zaštitnih plinova na geometrijska svojstva navara izvedenih robotiziranim postupkom TIG zavarivanja visokolegiranog Cr-Ni čeliku AISI 304.

Provedeno je robotizirano TIG navarivanje s četiri različite brzine zavarivanja i dva različita zaštitna plina – He3H1 i 100% Ar. Tako se eliminirao ljudski utjecaj na proces navarivanja. Dobra organizacija pokusa, odlična priprema ispitnih uzoraka i putanja robota bili su preduvjeti za ostvarivanje kvalitetnog TIG navara.

Analizom dobivenih rezultata ustanovljeno je da vrsta plinske mješavine značajno utječe na napon električnog luka, te posljedično i na profil navara i njegove geometrijske karakteristike. Korištenjem He3H1 dolazi do povećanja unosa topline čime se povećava i penetracije u odnosu na korištenje 100% Ar. Međutim, pri povećanju brzina zavarivanja penetracija se smanjuje bez obzira na to koji se zaštitni plin koristi. Korištenjem He3H1 i povećavanjem brzine zavarivanja u početku širina zavara raste da bi nakon određene brzine počela padati. Korištenjem 100% Ar i povećavanjem brzine zavarivanja širina zavara uvijek pada.

Na temelju ovakvih rezultata možemo zaključiti da je korištenje He3H1 isplativo kada je potrebno na jednostavan način povećati proizvodnost uz malo povećanje troškova uslijed korištenja skupljeg zaštitnog plina. Prema dobivenim rezultatima eksperimentalnog dijela rada moguće je definirati područje optimalnih parametara za oba zaštitna plina. Primjena He3H1 kao zaštitnog plina omogućuje zavarivanje korištenjem većih brzina zavarivanja uz dobivanje iste penetracije koja bi se dobila korištenjem 100% Ar i manje brzine zavarivanja. Optimalno područje brzina zavarivanja AISI 304 čelika debljine 4 mm uz korištenje He3H1 kao zaštitnog plina i uz zahtijevanu penetraciju od otprilike 3 mm je između 70 i 120 mm/min.

## 6. Literatura

- [1] M. Živčić; Časopis zavarivanje 1/2/3/ 85g. - TIG zavarivanje; Društvo za tehniku zavarivanja Hrvatske; FSB, Zagreb, 1985.
- [2] <https://www.millerwelds.com/resources/welding-resources/tig-welding-resources>, dostupno 20.02.2017.
- [3] I. Garašić, Z. Kožuh; Priručnik iz kolegija strojevi i oprema za zavarivanje; FSB, Zagreb, 2016.
- [4] <http://www.networkedblogs.com/blog/Engineeringhelp/>, dostupno 20.02.2017.
- [5] L. Čolić; Robotizirano zavarivanje nehrđajućih čelik A-TIG postupkom; Diplomski rad FSB, Zagreb, 2015.
- [6] I. Garašić; Službena predavanja iz predmeta Zavarivanje i montaža; FSB, Zagreb, 2014.
- [7] H. B. Cary, S. C. Helzer; Modern welding technology. Upper Saddle River, New Jersey, 2005.
- [8] <http://www.wcwelding.com/tig-welding.html>, dostupno 20.02.2017.
- [9] <http://www.eastwood.com/tig-gas-lens-components-and-kits.html>, dostupno 20.02.2017.
- [10] <https://www.diamondground.com/TungstenGuidebook.pdf>, dostupno 20.02.2017.
- [11] M. Grbin, B. Kovačević, M. Živčić; Elektrolučno zavarivanje u zaštiti plinova, UNIMEX, d.o.o., Zagreb, 1996
- [12] ASM International Handbook Committee: ASM Handbook – Welding, Brazing and Soldering, ASM International Materials park, 1993.
- [13] American Welding Society: Welding handbook – volume 2, American Welding Society, 1991.
- [14] G. Vručinić; Časopis zavarivanje 4/ 84g. - Impulsni TIG postupak zavarivanja; Društvo za tehniku zavarivanja Hrvatske; FSB, Zagreb, 1984. (357-362 str.)
- [15] [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1354629739-0-ssnc\\_7i8\\_pred\\_tekst.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1354629739-0-ssnc_7i8_pred_tekst.pdf), dostupno 20.02.2017.
- [16] I. Juraga, V. Šimunović, I. Stojanović; Zavarivanje Cr-Ni čelika, korozijska postojanost, rukovanje; FSB, Zagreb, 2007.
- [17] <http://www.daihen-varstroj.si/automation-and-robotisation/>, dostupno 20.02.2017.
- [18] <http://orionautomation.com.au/home/category-robot-welding-systems/product-robot-welding-tig-welding/>, dostupno 20.02.2017.
- [19] <http://www.directindustry.com/prod/binzel/product-5966-985557.html>, dostupno 20.02.2017.
- [20] <http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=140>, dostupno 20.02.2017.